

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DETERMINACIÓN DEL GRADO DE IMPACTOS  
EN MATERIALES COMPOSITES MEDIANTE  
TERMOGRAFÍA ACTIVA**

**(Determination of the degree of impacts in  
composites by active thermography)**

**Para acceder al Título de**

**GRADUADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**Autor: Manuel Ortiz Aja  
Septiembre – 2021**



## RESUMEN

El desarrollo de este proyecto consiste en la aplicación de la termografía activa pulsada con el objetivo de detectar defectos y determinar impactos sobre la superficie de materiales compuestos o composites.

Para ello se han empleado tres probetas de distinto tamaño y composición. Una probeta en fibra de carbono, una en fibra de vidrio y una última de dimensiones más reducidas en fibra de vidrio mezclada con fibras de aramida o KEVLAR®.

Para poder analizar las probetas, se han realizado ensayos no destructivos mediante termografía activa sobre ellas. Con el apoyo de una cámara térmica y su correspondiente software se han obtenido conjuntos de datos e imágenes sobre las cuales se ha efectuado un procesado.

En este trabajo se exponen distintos tipos de procesado de imágenes térmicas explicando sus características y funcionamiento. El método de procesado elegido es la reconstrucción de señales termográficas (TSR), el cual se lleva a cabo mediante el software matemático MATLAB®.

Una vez aplicado este proceso se han podido detectar los diferentes defectos y discontinuidades de cada una de las probetas de ensayo además de establecer las diferencias entre los distintos materiales ante el mismo proceso.

Con todo esto se ha probado la efectividad del método elegido, así como las herramientas de código matemático empleadas para ello.



## ABSTRACT

The development of this project consists of the application of pulsed active thermography with the aim of detecting defects and determining impacts on the surface of composite materials.

For this purpose, three specimens of different size and composition have been used. One specimen in carbon fiber, one in fiberglass and the last one, of smaller dimensions, made of fiberglass mixed with aramid fibers or KEVLAR®.

In order to analyze the specimens, non-destructive tests have been carried out by active thermography on them. With the support of a thermal camera and its corresponding software, data sets and images have been obtained on which have been processed.

In this project, different types of thermal image processing are exposed, explaining their characteristics and operation. The processing method chosen is thermal signal reconstruction (TSR). This image processing is developed using MATLAB® mathematical software.

Once this process has been applied, it has been possible to detect the different defects and discontinuities of each of the test specimens in addition to establishing the differences between the different materials before the same process.

With all this, the effectiveness of the chosen method has been proven, as well as the mathematical code tools used for it.



# ÍNDICE

<b>1-INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.1. PROBLEMA.....	10
1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	10
1.2.1 Métodos.....	10
1.3. OBJETIVO.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2-FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>18</b>
2.1 PROPAGACIÓN DE CALOR .....	18
2.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	20
2.2.1 Termografía pulsada.....	21
2.2.2 Termografía por escalón térmico .....	23
2.2.3 Termografía Lock-In .....	24
2.2.4 Vibrotermografía.....	25
2.3. MATERIALES COMPUESTOS .....	25
2.3.1 Definición.....	25
2.3.2 Composición.....	26
<b>3-ENSAYOS Y MEDIDAS.....</b>	<b>34</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	34
3.2. ENSAYOS .....	34
3.2.1 Probetas .....	37
3.2.2 Preprocesado .....	40
<b>4-PROCESADO.....</b>	<b>42</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	42
4.2. TIPOS DE PROCESADO .....	42



4.2.1 Contraste térmico absoluto y relativo (CA y CR) .....	42
4.2.2 Contraste absoluto diferencial (CAD) .....	43
4.2.3 Termografía de fase pulsada (PPT) .....	44
4.2.4 Termografía de componentes principales (PCT) .....	44
4.2.5 Termografía basada en estadísticos de alto orden (HOS) .....	45
4.2.6 Reconstrucción de señales termográficas (TSR) .....	45
4.3 Aplicación del procesado .....	47
<b>5-RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	50
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS .....	50
<b>6-CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>7-LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....</b>	<b>58</b>
<b>8-BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
<b>9-ANEXO .....</b>	<b>61</b>
9.1 CÓDIGO EMPLEADO .....	61
9.1.1 Función para aplicar el método de procesado TSR .....	61
9.1.2 Comportamiento de píxel en calentamiento y enfriamiento .....	62
9.1.3 Comportamiento píxel en función del material .....	64



## FIGURAS

Figura 1.Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección visual. ....	11
Figura 2.Representación esquemática de las etapas de inspección por líquidos penetrantes: a) Limpieza de la superficie, b) Aplicación del líquido penetrante, c) Eliminación del líquido sobrante, d) Extracción del líquido revelador acumulado. ....	12
Figura 3.Representación esquemática de ensayo no destructivo por partículas magnéticas. .....	13
Figura 4.Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección de corrientes inducidas.[8] .....	14
Figura 5.Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección por ultrasonidos .....	14
Figura 6.Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección radiográfica.[9] .....	15
Figura 7.Ejemplo de imagen termográfica obtenida con una cámara FLIR.[11].....	20
Figura 8.a) Estructura de la secuencia de imágenes adquiridas mediante END con termografía activa, b) Perfil térmico temporal (curva de enfriamiento) para el pixel i,j. [10] .	22
Figura 9.Diagrama de set-up empleado para la realización de un ensayo mediante termografía pulsada.[12] .....	22
Figura 10.Curvas típicas de calentamiento [10].....	23
Figura 11.Diagrama de set-up para ensayo de termografía por escalón térmico.[12].....	23
Figura 12.a) Diagrama de set-up para ensayo de termografía Lock-In, b) arriba: onda de excitación; abajo: onda capturada en el dispositivo infrarrojo [10][12] .....	24
Figura 13.Diagrama general de un procedimiento de vibrotermografía.[13] .....	25
Figura 14.Representación esquemática de la composición de un material compuesto. ....	26
Figura 15.a) Diagrama de matriz bajo carga compresiva, b) Diagrama de matriz bajo esfuerzo a tracción.[5].....	26



Figura 16. Configuraciones de los materiales de refuerzo a) Partículas, b) Fibras unidireccionales, c) Fibras entrelazadas o tejido, d) fibras con orientación aleatoria.....	29
Figura 17. Ejemplo de fibra de vidrio. [14].....	30
Figura 18. Ejemplo de piezas en fibra de carbono con diferentes formas.[15].....	31
Figura 19. Ejemplo de malla tubular en fibra de aramida KEVLAR.[16].....	32
Figura 20. a) Ejemplo de material de polietileno, b) Ejemplo de fibra de polietileno en hilos.[17] .....	32
Figura 21. Ejemplo de piezas en fibras cerámicas con diferentes formas.[18].....	33
Figura 22. Diagrama de setup empleado en los ensayos.[12] .....	35
Figura 23. Imagen del modelo de cámara FLIR SC 2000 utilizada en los ensayos. ....	36
Figura 24 . Probeta de fibra de carbono con defectos numerados. ....	37
Figura 25. Probeta de fibra de vidrio con defectos numerados.....	38
Figura 26. Probeta patrón .....	39
Figura 27. Ejemplo de curva calentamiento-enfriamiento.....	40
Figura 28. Ejemplo gráfico de la definición de contraste térmico absoluto[10].....	43
Figura 29 . Diferencia entre zona sana y zona con defecto mediante procesamiento TSR.[23] ..	46
Figura 30 . Secuencia de calentamiento, a) Primera imagen del calentamiento, b) imagen 4 del calentamiento, c) imagen 8 del calentamiento, d) última imagen correspondiente al calentamiento .....	48
Figura 31. Secuencia de enfriamiento a) Primera imagen del enfriamiento, b) imagen 66 de la secuencia, c) imagen 120 de la secuencia, d) última imagen correspondiente al enfriamiento .....	49
Figura 32. Secuencia de datos sintéticos de calentamiento a) Primera imagen procesada del calentamiento, b) imagen 4 de la secuencia procesada, c) imagen 8 de la secuencia procesada, d) última imagen procesada correspondiente al calentamiento, imagen 13 de la secuencia.....	51
Figura 33. Secuencia correspondiente a los coeficientes del polinomio de calentamiento De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se corresponden con los coeficientes A,B,C,D,E y F de la ecuación (15).....	52



Figura 34. Secuencia de datos sintéticos de enfriamiento a) Primera imagen procesada del enfriamiento, imagen 14 de la secuencia, b) imagen 66 de la secuencia de procesada, c) imagen 120 de la secuencia procesada, d) última imagen procesada correspondiente al enfriamiento, imagen13 de la secuencia. ....	52
Figura 35. Secuencia correspondiente a los coeficientes del polinomio de enfriamiento. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se corresponden con los coeficientes A,B,C,D,E y F de la ecuación (15).....	53
Figura 36 .a) Defectos detectados en la secuencia de calentamiento. b) Defectos detectados en la secuencia de enfriamiento.....	53
Figura 37. Defectos localizados en la imagen correspondiente al coeficiente E de la secuencia de calentamiento.....	54
Figura 38. Defectos localizados en la imagen correspondientes a los coeficientes D y E de la secuencia de enfriamiento. ....	54
Figura 39.a) Comportamiento píxel en zona de sana frente a píxel en zona de defecto durante el calentamiento. b) Comportamiento píxel en zona de sana frente a píxel en zona de defecto durante el enfriamiento. ....	55
Figura 40. Tendencias de píxeles respecto a energía de impacto en fibra de carbono y fibra de vidrio. ....	56





## ESQUEMAS

Esquema 1. Clasificación de Métodos END según la localización de discontinuidades .....	11
Esquema 2. Clasificación de las fibras de refuerzo según su naturaleza .....	28
Esquema 3. Estudio de secuencias de imágenes mediante termografía activa.....	41
Esquema 4. División de la matriz de datos Limpia .....	47

## TABLAS

Tabla 1 . Energía de impacto por defecto (Placa fibra de carbono) .....	38
Tabla 2. Energía de impacto por defecto (Placa fibra de vidrio) .....	39



# 1-INTRODUCCIÓN

## 1.1. PROBLEMA

El problema que se plantea en este trabajo consiste en la detección y caracterización de defectos e impactos sobre materiales compuestos o composites, haciendo especial énfasis en la fibra de vidrio y fibra de carbono. Se han elegido los materiales compuestos debido a su gran importancia en multitud de aplicaciones industriales, principalmente en el campo de la aeronáutica, además, su estudio se encuentra en continuo desarrollo.

En muchas ocasiones estos materiales pueden presentar la existencia o aparición de defectos, grietas o discontinuidades durante su vida útil o de servicio, que afectan y ponen en riesgo la integridad de las estructuras que conforman. Por ello, es necesario estudiar y predecir, en la medida de lo posible, el comportamiento y características de estos materiales. Estas razones promueven la aplicación de ensayos no destructivos (END).

## 1.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

El ensayo no destructivo (END) consiste en el examen o inspección de materiales, equipos u objetos con la finalidad de determinar sus propiedades y verificar su estado de calidad de manera que no resulten dañados o afectados. Los END permiten conocer y estudiar, de manera indirecta, las propiedades físicas, mecánicas o químicas de los materiales mediante diferentes procedimientos. Este tipo de ensayos se aplican en diferentes campos de la ingeniería para múltiples y diferenciados objetivos. Además de la detección de defectos y discontinuidades se emplean para el control de calidad de materiales, control preventivo de equipos y desarrollo de nuevos materiales. [1]

### 1.2.1 Métodos

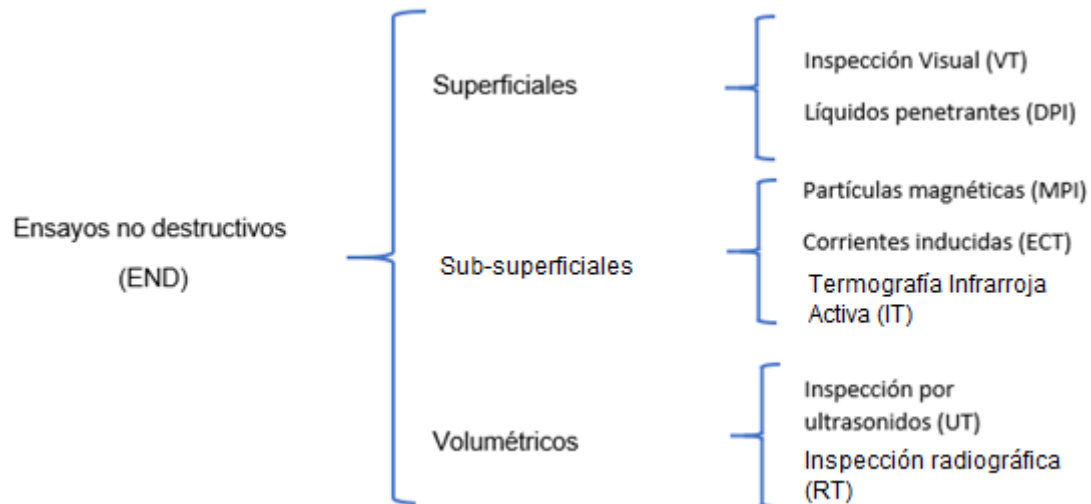
Existen distintos métodos o técnicas de END en función de los principios físicos aplicados a los materiales, lo que permite caracterizar su estado o naturaleza y destacar sus discontinuidades.

Se pueden clasificar los métodos desde el punto de vista de la localización de los defectos, es decir, si las discontinuidades se hayan en la superficie del material (superficiales), si se



hayan en zonas cercanas a la superficie (sub - superficiales) o en cualquier lugar del volumen del material (volumétricos). [1]

A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los métodos más relevantes de END siguiendo el siguiente esquema:



Esquema 1. Clasificación de Métodos END según la localización de discontinuidades

### Inspección visual

La inspección visual o *visual testing* (VT), es la técnica más sencilla y habitual en END. Con este método se pueden detectar discontinuidades superficiales en el objeto como pueden ser la corrosión, salpicaduras, quemaduras, grietas superficiales, niveles de acabado o evidencias de fugas. Dentro de la inspección visual se incluye la inspección a simple vista y la inspección con medios de apoyo como lupas, espejos, endoscopios, lentes de aumento o focos de iluminación (figura 1).

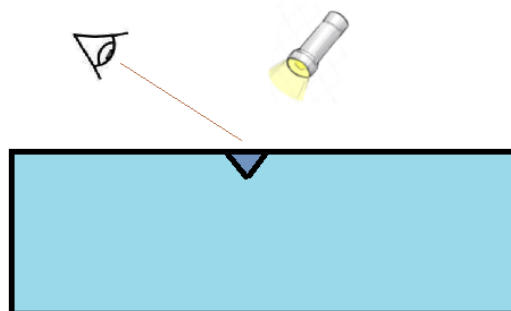


Figura 1. Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección visual.



La técnica de inspección visual es una técnica sencilla y adecuada para todo tipo de materiales. Por otro lado, solamente permite detectar discontinuidades superficiales. Para realizar una buena inspección visual no solo es necesario observar el objeto a ensayar, sino también, saber qué ver o qué buscar en el mismo.

### Inspección por líquidos penetrantes

La inspección de líquidos penetrantes o *dye penetrant inspection* (DPI), consiste en aplicar sobre la superficie del objeto de estudio un líquido coloreado que por el principio de capilaridad y pasado un tiempo, penetre por las discontinuidades de la superficie. Posteriormente se retira el exceso de líquido de la superficie del objeto y se aplica un revelador. El revelador es un producto secante que extrae el líquido que ha sido retenido dentro de las discontinuidades, destacando su presencia con colores vivos o iluminándola con luz ultravioleta (figura 2). La profundidad de las discontinuidades puede relacionarse con la cantidad de líquido acumulado. Esta técnica es válida para cualquier material que no sea poroso como metales ferrosos y no ferrosos, cerámicos, vidrios, polímeros o composites.



Figura 2. Representación esquemática de las etapas de inspección por líquidos penetrantes: a) Limpieza de la superficie, b) Aplicación del líquido penetrante, c) Eliminación del líquido sobrante, d) Extracción del líquido revelador acumulado.

Se trata de un método rápido para materiales que no sean porosos. En cuanto a sus desventajas, cabe destacar que mediante este tipo de ensayo no se puede detectar la profundidad de los defectos y existe riesgo de contaminación.



### Inspección por partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas o *magnetic particle Inspection* (MPI) se emplea para detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos. Esta técnica se basa inducir un campo magnético sobre el objeto de estudio y aplicar un polvo metálico (mediante partículas finas de un material magnético en seco o disolución) que se somete a la acción de dicho campo, de manera que las discontinuidades se detectan en aquellas zonas de la superficie del material donde se acumula el polvo metálico (figura 3).

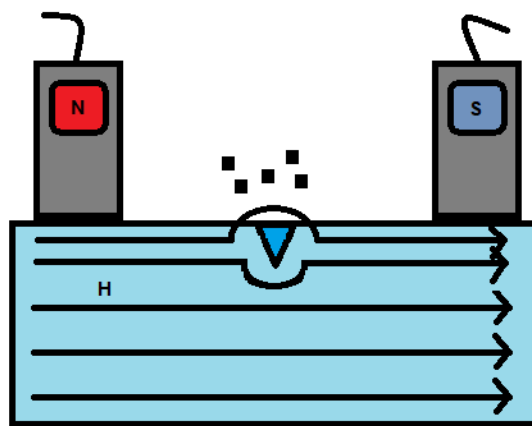


Figura 3. Representación esquemática de ensayo no destructivo por partículas magnéticas.

Esta técnica es fácil de aplicar, determina con exactitud la longitud de la discontinuidad, sin embargo, limita su empleo a materiales ferromagnéticos, además, solamente permite detectar discontinuidades superficiales.

### Inspección por corrientes inducidas

El ensayo de inspección por corrientes inducidas o *Eddy current testing* (ECT) es un método de inspección superficial y sub-superficial, se basa en la generación de corrientes eléctricas en un material conductor por medio de un campo magnético variable. La presencia de imperfecciones o discontinuidades en el material provoca alteraciones en las líneas de corriente eléctrica (corrientes de Eddy). Estas alteraciones producen, a su vez, cambios en el campo magnético que las propias corrientes eléctricas inducen, indicando la presencia de discontinuidades en el material (figura 4). Las corrientes inducidas son también un sistema idóneo para medir la conductividad, con lo cual este método permite además la caracterización del material. Una de las principales desventajas de este tipo de ensayo es



que se limita a materiales conductores, asimismo es un método difícil de aplicar a materiales ferromagnéticos y no posibilita la detección de la profundidad de los defectos.

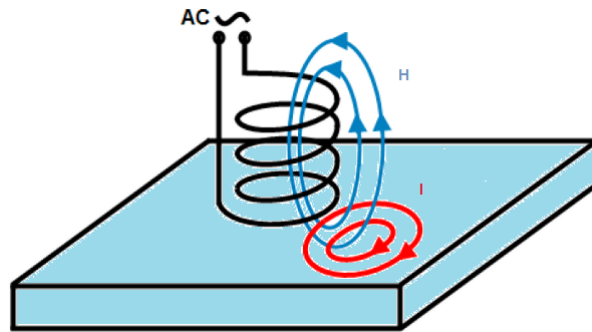


Figura 4. Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección de corrientes inducidas. [8]

## Inspección por ultrasonidos

El método de inspección por ultrasonidos o *ultrasonic testing* (UT) permite detectar irregularidades en el objeto de estudio mediante el uso de ondas mecánicas de frecuencia determinada. Estas ondas mecánicas se introducen en el material y se analiza su propagación para determinar la presencia de discontinuidades (figura 5). Esta técnica se basa en el principio de reflexión de ondas ultrasónicas en la interfase de medios diferentes. Una discontinuidad interna genera una interfase donde se refleja una porción de ondas.

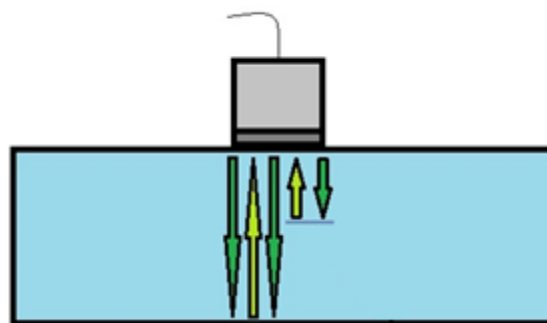


Figura 5. Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección por ultrasonidos

El procedimiento general de inspección por ultrasonidos consiste en emitir una serie de pulsos de ondas ultrasónicas generadas por un cristal piezoeléctrico, llamado palpador, el cual se



encarga de detectar los pulsos reflejados en las interfases, convirtiéndolos en señales eléctricas que se registran en un osciloscopio.

La inspección por ultrasonidos permite examinar objetos de gran espesor y realizar evaluaciones en zonas de difícil acceso. Proporciona información precisa de la profundidad a la que se encuentran las discontinuidades internas y es capaz de detectar defectos superficiales, por el contrario, presenta dificultades en la detección de defectos en zonas rugosas o de poco espesor.

### Inspección radiográfica

La inspección radiográfica o *radiographic testing* (RT) es un método volumétrico que permite detectar discontinuidades internas de los materiales. Consiste en atravesar una pieza con radiaciones electromagnéticas ionizantes (radiación gamma o rayos X) para examinar los defectos internos. La radiación ionizante atraviesa el material inspeccionado y produce una imagen negativa en una película situada tras la pieza (figura 6).

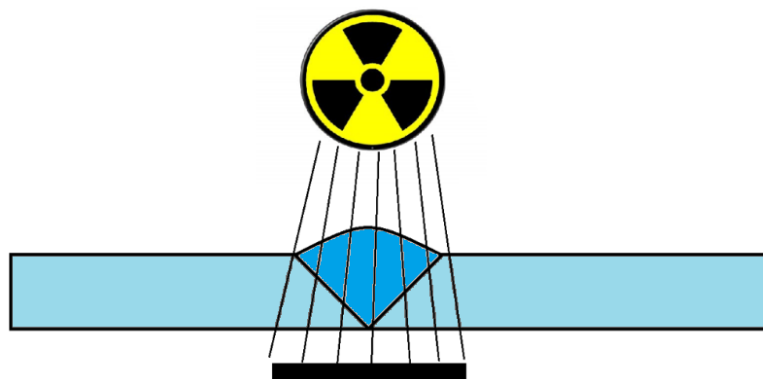


Figura 6. Representación esquemática de ensayo no destructivo por inspección radiográfica.[9]

La radiografía muestra la solidez interna de los materiales examinados. El grado de absorción de la radiación es diferente si la estructura interna del material no es uniforme, por tanto, las discontinuidades se muestran como cambios de densidad en la película. Es preciso tomar fuertes medidas de seguridad para evitar daños ocasionados por la radiación ionizante. Se considera una técnica con una elevada capacidad de penetración ya que inspecciona el volumen completo del objeto de ensayo. Es un procedimiento con una respuesta instantánea



y de gran precisión. En cuanto a sus inconvenientes, son muy similares a lo de la inspección por ultrasonidos, presentando dificultad en detectar discontinuidades en zonas muy próximas a la superficie, con rugosidad o poco espesor.

### **1.3. OBJETIVO**

Una vez explicadas brevemente las principales técnicas de ensayos no destructivos (END) que se utilizan para la detección de discontinuidades y defectos, se propone, en este trabajo, el estudio de otra técnica enmarcada en los ensayos superficiales y sub-superficiales: inspección mediante termografía infrarroja activa. Esta técnica se haya en pleno desarrollo técnico y científico.

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Como propósito general se expone la termografía infrarroja activa como modo de ensayo de materiales compuestos o composites. Además, se propone una metodología de procesamiento digital sobre una secuencia de imágenes térmicas, obtenidas a partir de la realización de un ensayo, que implique la propagación de calor por conducción sobre el objeto de estudio con el fin de detectar y caracterizar defectos internos en el elemento de ensayo.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

En lo que concierne a objetivos más concretos durante el desarrollo del presente trabajo se pueden enumerar los siguientes:

- Explicar en qué consiste la termografía activa, así como las técnicas más relevantes utilizadas.
- Aplicar la técnica de END mediante termografía infrarroja en laboratorio sobre tres probetas de materiales compuestos (en fibra de vidrio y fibra de carbono).





- Obtener un estado del arte acerca del procesamiento y análisis de imágenes térmicas aplicadas a la termografía activa en ensayos no destructivos de materiales compuestos.
- Establecer una relación entre los resultados experimentales obtenidos y los métodos teóricos aplicados.



## 2-FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Toda la información presentada en este apartado ha sido extraída de las referencias [2-7][10], además de la información complementaria adicional que se referencia en el propio texto.

### 2.1 PROPAGACIÓN DE CALOR

El calor es una forma de energía que se propaga de tres formas distintas: por conducción, convección y por radiación.

En el proceso de conducción se produce un intercambio térmico por contacto directo entre cuerpos, las moléculas transmiten su energía al otro cuerpo hasta que alcanzan su equilibrio térmico. En el caso de los fluidos las moléculas transmiten la energía mediante colisiones, mientras que en el caso de los sólidos lo hacen mediante vibraciones. Según la ley de Fourier (expresión 1) la transferencia de calor por conducción depende de la diferencia entre temperaturas, la distancia de propagación y la conductividad térmica  $\kappa$ :

$$Q_{cd} = -\kappa \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \quad (1)$$

La convección se produce debido a movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural, producida por las diferencias de densidades de la materia, o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro.

$$Q_{cv} = h_{cv}(T_s - T_f) \quad (2)$$

La radiación de calor es un fenómeno que se basa en la propiedad de todo cuerpo caliente de transferir su energía térmica a su entorno a través de una onda electromagnética que principalmente contiene componentes de frecuencia en el espectro infrarrojo. El calor irradiado responde a la ley de Stefan-Boltzmann (expresión 3), donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $\epsilon$  corresponde a la emisividad del cuerpo (para el cuerpo negro  $\epsilon = 1$ )

$$Q_{rd} = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$



En un ensayo no destructivo (END) mediante termografía infrarroja activa se irradia calor a partir de una fuente de calor externa que genera una onda térmica hacia el objeto de ensayo. Cuando la onda térmica llega a la superficie del material se produce una pérdida de calor por convección entre el material y el ambiente que le rodea, mientras que el calor restante continúa su propagación hacia el interior del material mediante un proceso de conducción. Dado que la excitación térmica es mayor que el flujo de calor por convección que se pierde, este fenómeno se puede modelar a partir de la siguiente ecuación diferencial de transferencia de calor por conducción [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w(x, y, z) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

En la ecuación anterior, C es el calor específico del material [J/kg.K],  $\rho$  es la densidad [Kg/m<sup>3</sup>], x,y,z son las coordenadas espaciales,  $\kappa$  es la conductividad térmica en la dirección  $i$ , y  $w(x,y,z)$  corresponde a la generación de calor por unidad de volumen [W/m<sup>3</sup>] [10].

Ya que en los ensayos no destructivos no se presenta una fuente de calor interna al material y se considera que el material es isotrópico, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Siendo  $\alpha$  la difusividad del material siendo ésta  $\alpha = k/C\rho$ . La ecuación anterior corresponde al análisis transitorio de la evolución térmica por conducción, Por otro lado, se suele trabajar también con la ecuación de transferencia de calor para el estado estacionario:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$



## 2.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja o *infrared thermography* (IT) es una técnica de ensayo no destructivo (END) que consiste en aplicar y distribuir temperatura sobre la superficie de un cuerpo, midiendo y cuantificando su radiación infrarroja con el fin de detectar posibles defectos o irregularidades sobre la superficie de dicho material (figura 7). La termografía infrarroja se puede emplear en dos marcos diferentes: termografía pasiva y termografía activa. El presente proyecto se centra en esta última en particular.

Termografía pasiva: Se trabaja con la radiación térmica natural de un sistema generada por su propio funcionamiento o por su interacción con otras fuentes y flujos de calor.

Termografía activa: Se aplica energía mediante calor sobre el cuerpo que es objeto de estudio para poder determinar diferencias de temperatura sobre su superficie que de otra manera serían imperceptibles en condiciones naturales, es decir, sin un contraste térmico.

La termografía infrarroja presenta las ventajas de ser un método que no requiere de contacto directo con el objeto de estudio, presenta facilidad en la implementación, no requiere mucho tiempo y existen multitud de aplicaciones para esta técnica. Por otro lado, presenta inconvenientes, tales como que se trata de un método que depende de las condiciones ambientales, existen pérdidas de calor por radiación o convección que pueden causar perturbaciones en el contraste térmico y que los defectos detectables generalmente sean sub-superficiales

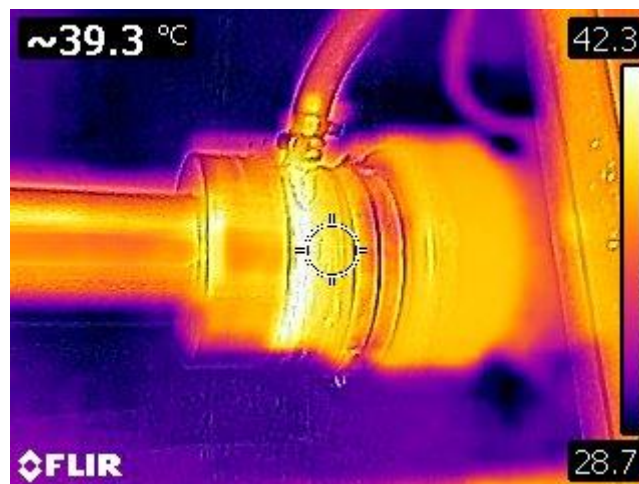


Figura 7. Ejemplo de imagen termográfica obtenida con una cámara FLIR.[11]



Para aplicar de manera correcta la técnica de termografía activa se han de cumplir una serie de requisitos en la realización de los ensayos. Debe de existir una diferencia de temperatura entre el objeto de estudio y el entorno, esta diferencia de temperatura recibe el nombre de contraste térmico y se denota matemáticamente como  $\Delta T$ . Los defectos o discontinuidades que se pretenden hallar deben tener propiedades físico-térmicas diferentes al material del objeto de estudio, ya que, si esto no se cumple, será imposible realizar un contraste térmico. En último lugar, es necesario destacar que se ha de contar con equipos adecuados para la estimulación térmica de los objetos y para la adquisición de imágenes infrarrojas y toma de datos.

A continuación, se describen diferentes métodos de aplicación de la termografía activa en función de los mecanismos y técnicas empleados para excitar térmicamente la superficie del objeto de ensayo.

### 2.2.1 Termografía pulsada

La termografía pulsada constituye el procedimiento más común en END con termografía infrarroja, y el que ha permitido que la termografía en general adquiera relevancia en el campo del END al superar dos grandes obstáculos presentados en su aplicación práctica: la repetibilidad de los resultados y su capacidad para ser automatizada. En la realización de un procedimiento de ensayo por termografía pulsada el calentamiento del objeto se genera mediante un pulso de calor (generado con lámparas o flashes de alta intensidad lumínica) cuyo ancho, en relación directa a la conductividad térmica del material de aquél, puede estar entre algunos milisegundos y unos cuantos segundos, lo cual lo hace un método rápido (figura 9). La información de interés se concentra en las curvas de enfriamiento del objeto estudiado (figura 8), ya que en la región donde exista algún defecto bajo la superficie se presenta un cambio en las características de propagación del calor, provocando entonces un contraste térmico apreciable. [10].

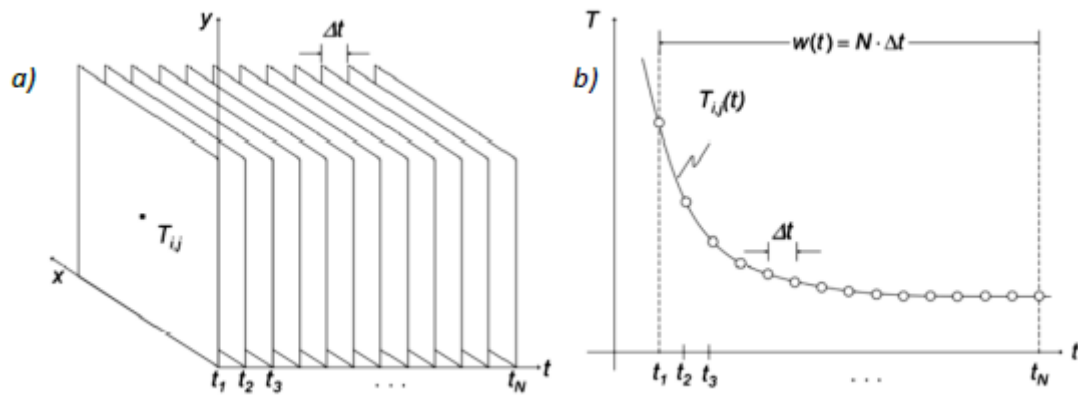


Figura 8.a) Estructura de la secuencia de imágenes adquiridas mediante END con termografía activa, b) Perfil térmico temporal (curva de enfriamiento) para el pixel  $i,j$ . [10]

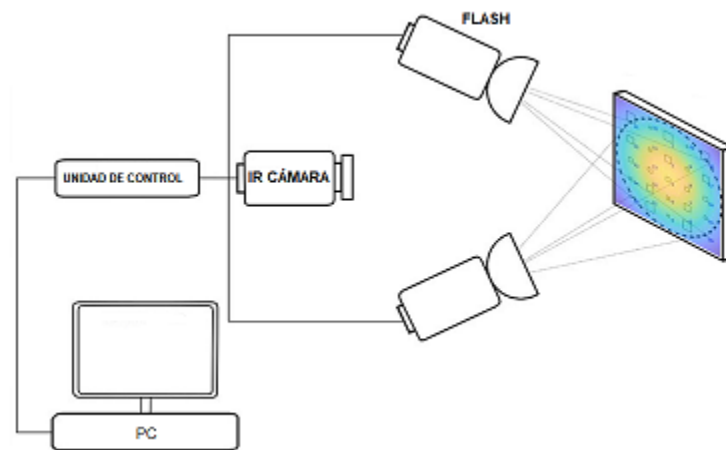


Figura 9. Diagrama de set-up empleado para la realización de un ensayo mediante termografía pulsada. [12]



## 2.2.2 Termografía por escalón térmico

En este tipo de ensayo se busca monitorear el calentamiento progresivo del material cuando es expuesto a la incidencia de un escalón de calor como se muestra en la figura 11. Mediante esta técnica se pueden utilizar fuentes de calor que no son suficientemente potentes como para aplicarse en la termografía pulsada, además, permite inspeccionar materiales de muy poca conductividad en donde la termografía pulsada no entregaría resultados apreciables.

En este caso las diferentes curvas de calentamiento de cada punto en la muestra son importes para el análisis (figura 10).

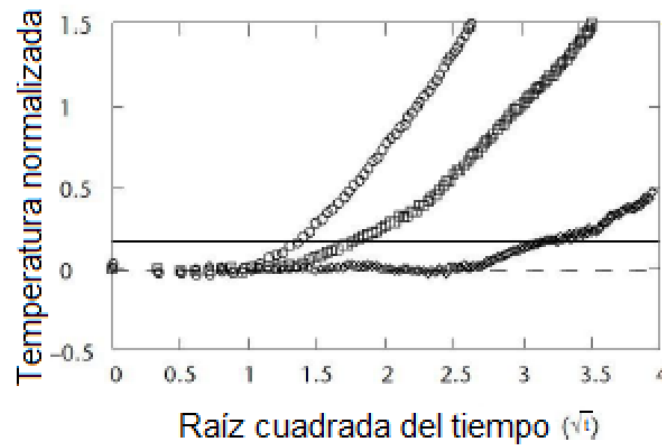


Figura 10. Curvas típicas de calentamiento [10]

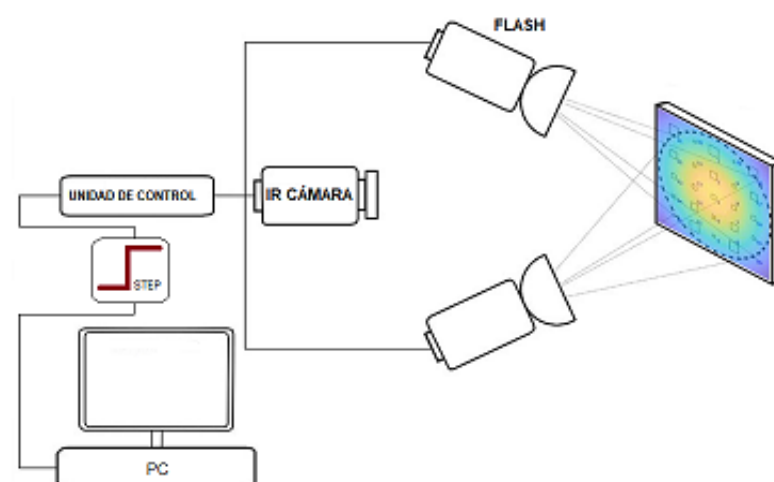


Figura 11. Diagrama de set-up para ensayo de termografía por escalón térmico. [12]



### 2.2.3 Termografía Lock-In

En esta técnica se aplica una luz intensa para inyectar calor en la superficie del objeto de ensayo. La intensidad de esta luz se modula con una onda senoidal con la intención de generar una onda térmica estacionaria en el material, a partir de la cual se pueden obtener imágenes de amplitud y fase (figura 12). La principal ventaja de esta técnica radica en que es posible ajustar la profundidad de exploración mediante la variación en forma inversa de la frecuencia de la onda térmica producida. Se puede modificar este procedimiento mediante el uso de una onda ultrasónica modulada con una baja frecuencia, de manera que la alta frecuencia ultrasónica (típicamente de 40KHz) genere el calor interno por vibración elástica mientras que la envolvente de baja frecuencia genere la onda térmica deseada.

Una técnica derivada de la termografía *Lock-In* y de la termografía pulsada es la llamada termografía de fase pulsada, en la que se combina la rapidez del método de estimulación a través de un pulso de calor, con las ventajas del cálculo de imágenes de fase a partir de las curvas de enfriamiento de cada punto o píxel del objeto examinado consistente en que representan una información muy poco sensible a las características ópticas de la superficie, como el calentamiento no uniforme. [10]

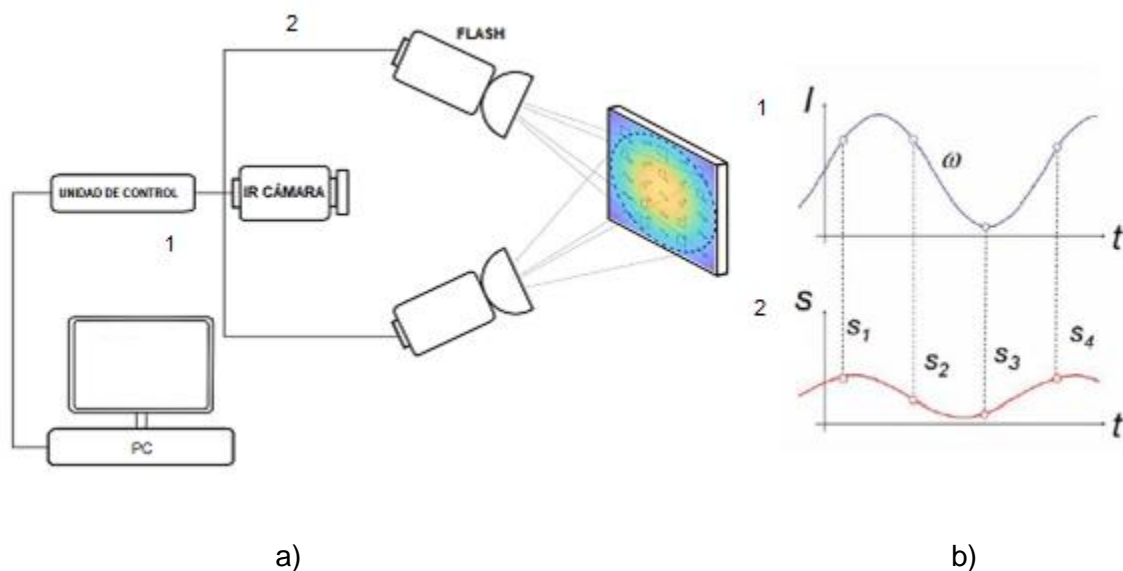


Figura 12.a) Diagrama de set-up para ensayo de termografía Lock-In, b) arriba: onda de excitación; abajo: onda capturada en el dispositivo infrarrojo [10][12]





## 2.2.4 Vibrotermografía

La vibrotermografía es una técnica que utiliza la vibración mecánica de algunas decenas de hercios aplicada al objeto de ensayo con el objetivo de que la fricción producida en las discontinuidades internas o en posibles defectos del material se traduzca en un incremento local de la temperatura que pueda ser detectado (figura 13). También existe la modalidad de usar ultrasonido de baja frecuencia en modo transmisión continuo, con el fin de calentar por microvibración una zona de la muestra inspeccionada; si existe alguna anomalía interna, se detectará en las imágenes infrarrojas captadas por la cámara térmica.

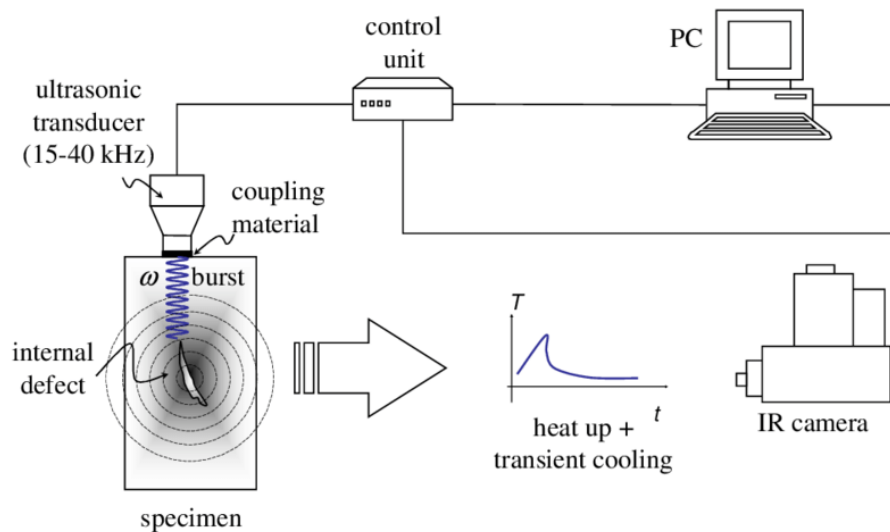


Figura 13. Diagrama general de un procedimiento de vibrotermografía.[13]

## 2.3. MATERIALES COMPUESTOS

### 2.3.1 Definición

Un material compuesto o composite es la combinación de dos o más materiales diferentes que da como resultado un producto final cuyas características son superiores a las de los materiales que lo constituyen.

Se trata por tanto de la unión de uno o varios materiales de refuerzo y de un material aglutinante, también llamado matriz.



## 2.3.2 Composición

### Matriz

Casi todos los materiales compuestos están constituidos por una matriz y unas fibras de refuerzo (figura 14). La matriz del composite suele ser la parte más tenaz, aunque también la menos resistente y dura. La parte reforzante suele ser de mayor resistencia y con más alto módulo elástico, pero también la de mayor fragilidad.

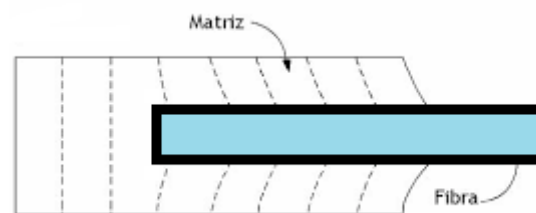


Figura 14. Representación esquemática de la composición de un material compuesto.

El criterio principal en el desarrollo de nuevos materiales compuestos reside en maximizar los módulos de elasticidad longitudinales manteniendo valores controlados de resistencia mecánica, resistencia al impacto, deformación y tenacidad a la fractura. Las propiedades de tracción de los materiales compuestos están condicionadas por las fibras empleadas, de esta forma, la elección del tipo de fibra determinará necesariamente la aplicación del material. En lo referente a las propiedades de compresión, éstas dependen tanto de las fibras empleadas como de la matriz (figura 15). El tipo de fibras empleado condiciona el módulo de compresión, mientras que el módulo de cizalladura de la matriz limita la resistencia a compresión.

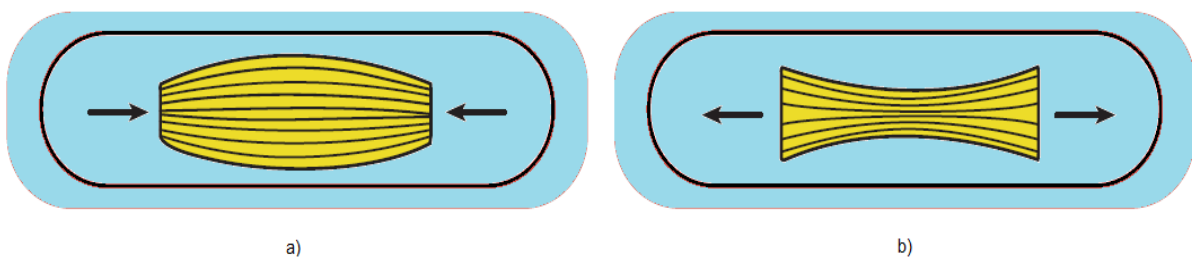


Figura 15.a) Diagrama de matriz bajo carga compresiva, b) Diagrama de matriz bajo esfuerzo a tracción.[5]



Para entender en mayor medida qué son los materiales compuestos es necesario desarrollar los diferentes tipos de matrices, materiales de refuerzo y cómo se relacionan entre ellos.

Las funciones de la matriz son diversas. En primer lugar, la matriz actúa como soporte de los materiales de refuerzo permitiendo moldearlos de manera adecuada. Protege a los materiales de refuerzo frente a agentes externos como la humedad, corrosión o impactos. Otra de las funciones reside en evitar la propagación de grietas durante un proceso de fractura y mantiene alineadas las fibras o los refuerzos para que el composite trabaje conforme a sus criterios de diseño.

Las matrices para materiales compuestos se pueden clasificar en tres grupos en función de su naturaleza.

- Cerámica: presentan un difícil procesado, una gran utilidad en aplicaciones de biocompatibilidad y en compuestos a elevadas temperaturas.
- Metálica: estas matrices presentan un comportamiento similar a las matrices cerámicas. Se emplean metales o aleaciones y como refuerzos fibras de altas prestaciones para soportar altas temperaturas. Su proceso de fabricación es muy complejo puesto que las altas temperaturas de fusión de algunos metales y aleaciones son capaces de degradar las fibras. El rango de temperaturas de uso se encuentra en 300 °C – 500 °C. Entre los materiales compuestos con esta matriz se encuentran los materiales compuestos de boro/aluminio, grafito/aluminio y carburo de silicio/aluminio.
- Orgánica: se caracterizan por su fácil procesado y ofrecen un amplio rango de propiedades. Se trata de las matrices más empleadas y se pueden agrupar en 3 subgrupos:
  - Termoplásticas: Presentan una excelente capacidad de deformación, así como una alta resistencia frente a la humedad y su vida útil es ilimitada. Su procesado se realiza a elevadas temperaturas, sin embargo, presenta tiempos de procesado más cortos que en el caso de las matrices termoestables.
  - Termoestables: Se basan en el empleo de resinas bi-componentes, se pueden procesar a temperatura ambiente, lo cual permite que sean las más utilizadas en la fabricación de materiales compuestos. Presentan excelentes propiedades

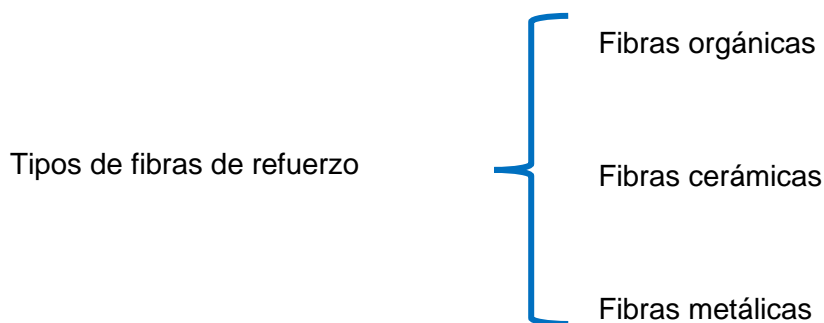


adhesivas, una alta resistencia química, buen comportamiento en calor húmedo y altas propiedades dieléctricas.

- 
- Elastómeros: Se trata de polímeros que presentan una estructura elástica debido a que su composición química carece de la presencia de elementos metálicos.

### Materiales de refuerzo

Los materiales de refuerzo dotan al material de rigidez y resistencia a tracción, compresión y flexión. El tipo de refuerzo determina las propiedades térmicas y eléctricas del material compuesto. Existe una gran variedad de materiales de refuerzo así como diferentes configuraciones (figura 16) siendo las partículas y fibras entrelazadas los refuerzos de mayor uso. Las fibras de refuerzo que se emplean de manera más común son:



*Esquema 2. Clasificación de las fibras de refuerzo según su naturaleza*

- Fibras orgánicas: ofrecen alta resistencia y peso ligero. Dentro de este grupo se encuentran las fibras de vidrio, aramida, polietileno y carbono.
- Fibras cerámicas: soportan altas temperaturas. Dentro de este grupo se encuentran las fibras de cuarzo, carburo de silicio y alúmina
- Fibras metálicas: excelentes conductores de calor y electricidad

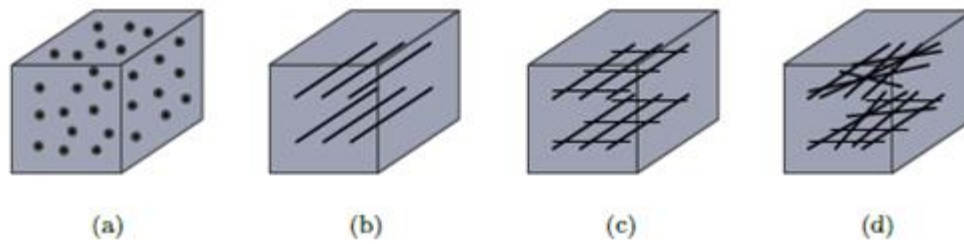


Figura 16. Configuraciones de los materiales de refuerzo a) Partículas, b) Fibras unidireccionales, c) Fibras entrelazadas o tejido, d) fibras con orientación aleatoria.

A continuación, se explican brevemente las fibras más utilizadas en la composición de los composites, dando mayor importancia a la fibra de vidrio y fibra de carbono, ya que son los materiales con los cuales se han realizado los ensayos que se explican en el apartado tercero (Ensayos y medidas) del documento.

#### Fibras de vidrio

La fibra de vidrio es el material de refuerzo más empleado en composites debido a su bajo coste, peso ligero, alta resistencia y sus características dieléctricas y aislantes del calor. Los materiales compuestos de fibra de vidrio se usan generalmente para fabricar piezas que no están sometidas a importantes esfuerzos mecánicos (figura 17).

Existen dos tipos de fibra de vidrio de uso más extendido: el vidrio tipo E y el vidrio tipo S.

El vidrio tipo E se utiliza habitualmente para aplicaciones eléctricas, presenta una buena relación resistencia/peso, alta resistencia a fatiga, excelentes propiedades dieléctricas y tiene una excelente resistencia a la corrosión. El vidrio tipo S tiene mayor resistencia mecánica, un 25% más de resistencia a compresión, un 40% más de resistencia a tracción, un módulo de elasticidad 20% mayor y una densidad 4% menor. El vidrio tipo S se emplea en aplicaciones que requieren propiedades mecánicas superiores.



*Figura 17. Ejemplo de fibra de vidrio. [14]*

### Fibras de carbono

Las fibras de carbono son uno de los materiales más resistentes y rígidos que se emplean como refuerzo en la fabricación de materiales compuestos. Se trata de materiales con propiedades de gran interés debido principalmente a su alta relación resistencia/peso y rigidez/peso.

Mediante una colocación específica de las fibras se consiguen materiales más fuertes y rígidos que piezas similares de acero, con una reducción de peso de hasta el 50 %. Existen tres categorías principales de fibras de carbono: poliacrilonitrilo, brea y fibras basadas en Rayón.

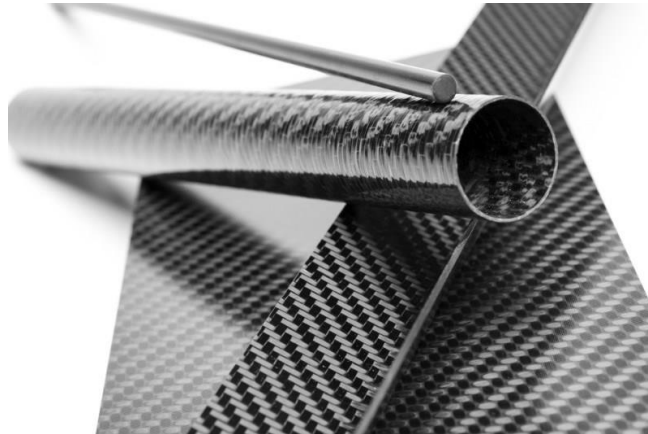
Las fibras derivadas del poliacrilonitrilo (PAN) se utilizan desde hace muchos años y se encuentran actualmente en un avanzado estado de desarrollo. Las fibras de PAN destacan por su mayor resistencia y mejor equilibrio de propiedades mecánicas de entre todos los materiales compuestos. Hay disponibles diferentes productos comerciales (figura 18) clasificados según el nivel del módulo de elasticidad, llegando a alcanzar valores de hasta 897 GPa. Estas fibras se emplean en aplicaciones que requieren materiales con alta resistencia y retención eficiente de propiedades.

Las fibras basadas en brea se desarrollaron posteriormente a las fibras de PAN. Estas fibras tienen menos resistencia que las fibras PAN pero ofrecen ciertas ventajas en aplicaciones de



rigidez crítica debido a su facilidad para procesar materiales de alto módulo de elasticidad. Por el contrario, el elevado coste de la materia prima limita en gran medida la aplicación de este tipo de fibras.

Finalmente, las fibras de carbono basadas en un precursor de Rayón tienen peores propiedades mecánicas que las fibras de PAN y brea.



*Figura 18. Ejemplo de piezas en fibra de carbono con diferentes formas.[15]*

### Fibras de aramida (KEVLAR®)

Este tipo de fibra posee una alta dureza y una elevada capacidad de absorción de energía. Este material presenta una alta rigidez y resistencia a la tracción con una densidad muy baja. En cambio, posee una baja resistencia a la compresión. Cuando se demanda de una mayor capacidad de compresión se recurre a combinaciones de fibras de aramida con fibras de carbono.

La aramida posee una resistencia a tracción elevada superior a la del acero y presenta un comportamiento frágil. Este material presenta un comportamiento diferente en condiciones de carga compresiva puesto que a partir de una determinada carga pierde el comportamiento lineal, lo que le limita en diferentes usos y aplicaciones. En la figura 19 se muestra un ejemplo de malla tubular fabricada a partir de fibras de aramida.



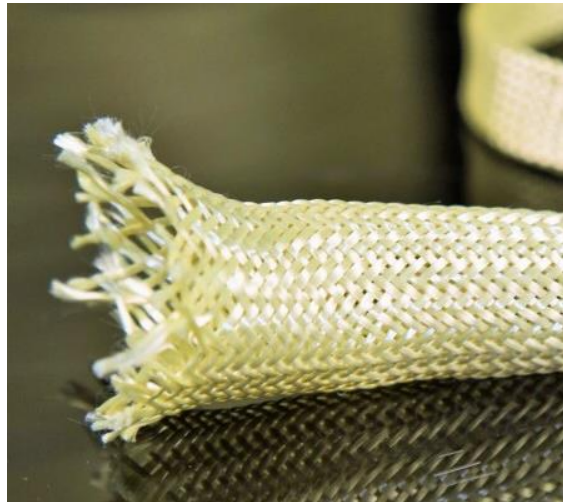


Figura 19. Ejemplo de malla tubular en fibra de aramida KEVLAR.[16]

### Fibras de polietileno

Las fibras de polietileno (figura 20) presentan una elevada resistencia a impactos, mayor que en el caso de las fibras de aramida y de vidrio. Estas fibras tienen mejores propiedades dieléctricas que otros materiales compuestos, siendo su constante dieléctrica 30% menor que la del compuesto aramida/epoxi y 50% menor que la del vidrio/epoxi. Las fibras de polietileno funden a temperaturas relativamente bajas y son buenos aislantes de la humedad.



Figura 20. a) Ejemplo de material de polietileno, b) Ejemplo de fibra de polietileno en hilos.[17]

### Fibras cerámicas

El empleo de matrices metálicas y cerámicas está asociado a temperaturas de fabricación y trabajo que pueden ser muy altas, de esta forma, se emplean distintos tipos de fibras





cerámicas (figura 21). Las fibras cerámicas más comunes son: fibras de cuarzo, carburo de silicio y alúmina.

Las fibras de cuarzo soportan temperaturas en servicio de más de 1040°C y tienen una resistencia a tracción de 3.4 GPa, siendo una de las resistencias más altas entre los materiales resistentes a altas temperaturas. Las fibras de cuarzo también presentan altas relaciones resistencia/peso y baja densidad.

Las fibras de carburo de silicio son cerámicas que conservan una alta resistencia mecánica a temperaturas superiores a 980°C. Las principales ventajas que ofrecen las fibras de carburo de silicio son una alta resistencia mecánica, resistencia a altas temperaturas (hasta 1200°C), buenas propiedades dieléctricas, buena resistencia a la corrosión y alta compatibilidad con matrices poliméricas y metálicas.

Las fibras de alúmina tienen un módulo de elasticidad 40% mayor que el de las fibras de carburo de silicio. La temperatura en servicio de este tipo de fibras es superior a 980°C. Es una fibra frágil y quebradiza, siendo su principal aplicación como refuerzo de matrices de aluminio.



*Figura 21. Ejemplo de piezas en fibras cerámicas con diferentes formas.[18]*

### Fibras de boro

Las fibras de boro se obtienen a través de un proceso complejo de deposición de boro gaseoso sobre un filamento de tungsteno. La fibra de boro es más resistente que la fibra de carbono. Estas fibras son compatibles con matrices orgánicas y metálicas, y dan como resultado, materiales ligeros. La principal limitación de las fibras de boro es la dificultad que presenta su manejo y procesado, que junto con el alto coste de fabricación han limitado en gran medida su uso.



## 3-ENSAYOS Y MEDIDAS

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Para la realización de este proyecto se han realizado ensayos no destructivos (END), mediante termografía infrarroja activa, de probetas de dos materiales diferentes, fibra de vidrio y fibra de carbono. En este apartado de ensayos y medidas se explica el desarrollo seguido para realizar los diferentes ensayos, los equipos y materiales empleados, así como el manejo de los datos obtenidos.

### 3.2. ENSAYOS

El método de ensayo elegido para este trabajo es la termografía infrarroja activa y más concretamente la técnica de termografía pulsada. Se trata de la técnica más utilizada debido a que es un método rápido y con muchas posibilidades para ser automatizado.

Se dispone de tres probetas de ensayo diferentes, tanto en sus dimensiones como en su composición. Una placa rectangular en fibra de carbono con ocho impactos en su superficie, una placa de similares dimensiones en fibra de vidrio con ocho impactos en su superficie y por último una placa cuadrada más pequeña en fibra de vidrio a la cual se le han incorporado fibras de KEVLAR®. Cada impacto tiene asociado un nivel de energía de impacto correspondiente. El objetivo consiste en realizar ensayos con cada uno de los defectos de las probetas.

La explicación del procedimiento seguido en los ensayos se apoya en la imagen del setup empleado (figura 22).

En primer lugar, se han de acotar las zonas correspondientes a cada uno de los defectos de cada probeta, ya que se realiza un ensayo por cada defecto. Para ello, se fija un área alrededor del defecto con cinta adhesiva, acto seguido, se han de situar las probetas en un soporte dejando en una posición centrada la zona del defecto que se pretende ensayar.

Para la aplicación de la energía térmica sobre la superficie de las probetas se utiliza una pistola de aire caliente. La pistola de aire caliente es un instrumento que emite un flujo de aire caliente, que debidamente dirigido sobre el objeto, permite calentar rápidamente su superficie. Además, dispone de diferentes toberas para regular el caudal de aire caliente



proporcionado. De esta manera, la pistola de aire caliente se sitúa lo más centrada posible respecto de la probeta (el flujo no incidirá perpendicularmente debido a la presencia de la cámara, tal y como se aprecia en la figura 22) con la intención de dirigir el flujo de aire caliente sobre el defecto que se ensaya y excitarlo térmicamente.

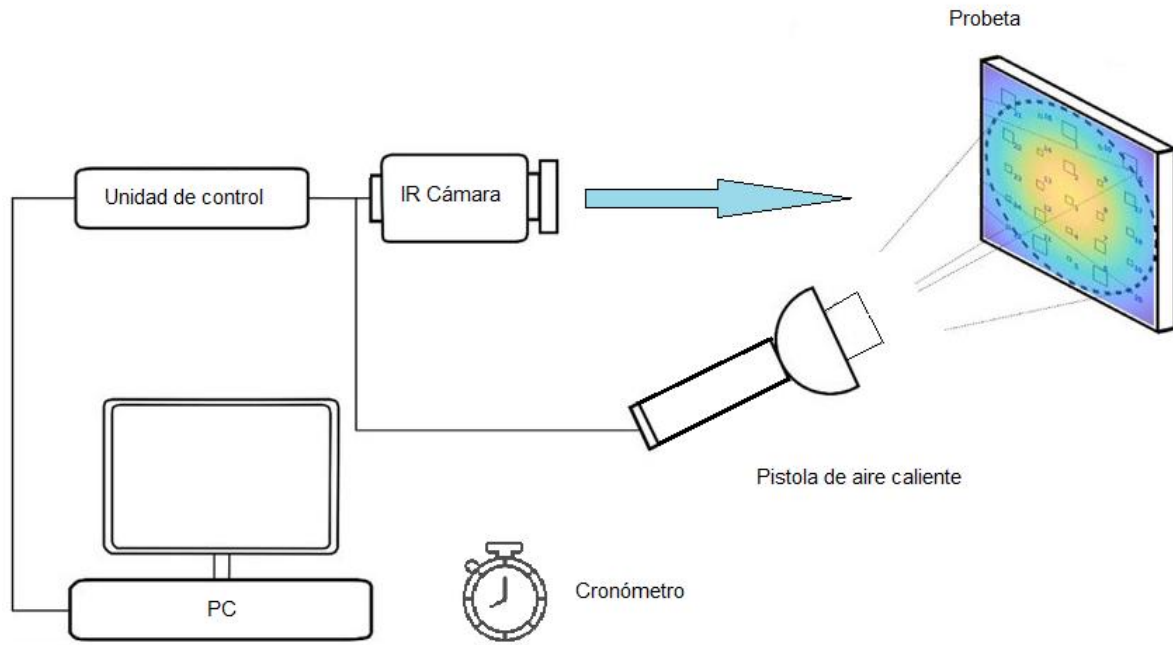


Figura 22. Diagrama de setup empleado en los ensayos.[12]

Una vez situada la pistola de aire caliente y la probeta que se pretende ensayar, se establece la posición de la cámara térmica de tal manera que el defecto que se pretende localizar y observar quede lo más centrado posible en la imagen. La cámara térmica dispone de un software que permite, en tiempo real, comprobar la imagen que está tomando, de este modo se puede ajustar el enfoque de la imagen cuanto sea necesario. La captura de imágenes infrarrojas de los ensayos se lleva a cabo con una cámara Flir Thermacam SC2000 (figura 23). Se trata de una cámara de medición de temperaturas e imágenes infrarrojas de plano focal (FPA) de alto rendimiento, es capaz de tomar imágenes a una velocidad de seis imágenes por segundo. Está diseñada específicamente para aplicaciones científicas. Respecto a sus especificaciones cabe destacar que cuenta con salida digital de 14 bits en tiempo real, alta sensibilidad térmica con un rango de medida de  $[-40^{\circ}\text{C} - 2000^{\circ}\text{C}]$ . Genera imágenes térmicas de color de alta definición con más de 76000 puntos de medición individuales por imagen, lo que permite, medir y cuantificar con patrones de color cambios de



temperatura de hasta  $0.1^{\circ}\text{C}$ . El conector de 14 bits proporciona en tiempo real los datos mediante su propio software de almacenamiento y análisis digital ThermaCAM® Researcher™, lo que proporciona un método preciso y eficaz para analizar las condiciones térmicas de los objetos de estudio. [19][20]



*Figura 23. Imagen del modelo de cámara FLIR SC 2000 utilizada en los ensayos.*

El conjunto de imágenes y datos proporcionados por la cámara, se controlan mediante el propio software de la cámara, anteriormente citado. Éste permite exportar de manera sencilla las imágenes como documentos Matlab® que serán empleados en el preprocesado y procesado de imágenes con el propósito de analizar los defectos y discontinuidades de las probetas.

Por cada defecto analizado, se toman 400 imágenes repartidas en dos ensayos diferentes. En el primero se toman 200 imágenes y se calienta la superficie de la probeta durante un periodo de tiempo de 10 segundos, en el segundo, se toman otras 200 imágenes, esta vez, con un periodo de calentamiento de 15 segundos. De manera general es necesario comentar que el ensayo dura unos pocos segundos dado que la conductividad tanto de la fibra de carbono como de la fibra de vidrio es baja. El ensayo comienza ejecutando la orden de captura de imágenes, a través del software de la cámara, para que empiece a tomar las 200 imágenes establecidas con una velocidad ya citada de seis imágenes por segundo. En primer lugar, se espera unos segundos para disponer de unas pocas imágenes en las cuales no se haya alterado la temperatura de la superficie de la probeta. A estas imágenes se les denomina



imágenes frías. Estas imágenes proporcionan información del entorno y se utilizan para mejorar el contraste, así como para atenuar patrones de ruido de la cámara.

Pasados unos segundos se enciende la pistola de aire caliente durante el periodo de tiempo fijado controlado mediante un cronómetro (10 o 15 segundos), transcurrido el tiempo de calentamiento, se apaga la pistola de aire caliente y se deja enfriar la probeta hasta que se hayan tomado el conjunto de imágenes al completo. Es necesario antes de repetir cualquier ensayo esperar un tiempo prudencial hasta que la superficie de la probeta que se ensaya vuelva a la temperatura inicial. Este tiempo depende de la emisividad del material.

Este proceso se realiza para cada defecto con tiempos de calentamiento de 10 y 15 segundos, de este modo se obtienen un total de 6800 imágenes de todos los ensayos.

### 3.2.1 Probetas

Como se ha comentado en el apartado anterior, para los ensayos se han utilizado tres probetas diferentes. En este apartado se muestran y explican las características más importantes de estas probetas.

La primera probeta es la placa en fibra de carbono, se trata de una placa rectangular con unas dimensiones aproximadas de 30 centímetros de largo, 20 centímetros de ancho y menos de 0.5 centímetros de espesor. La superficie presenta ocho defectos producidos por impactos con un nivel determinado de energía (Tabla 1) y una distribución determinada (figura 24). El nivel de acabado presenta alguna irregularidad en la superficie de la pieza y se observa como este material refleja de manera notable la luz al incidir sobre ella (figura 24).

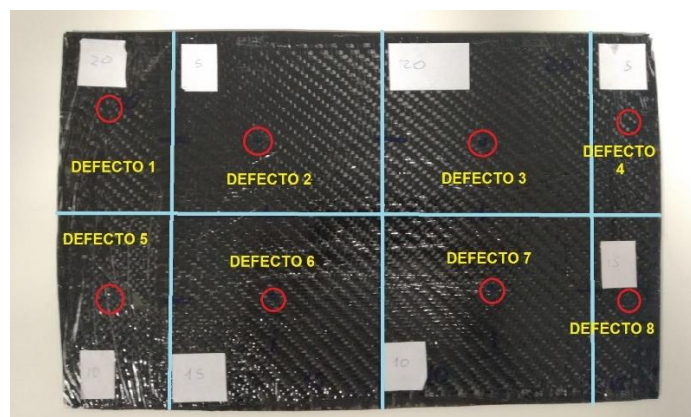


Figura 24 .Probeta de fibra de carbono con defectos numerados.



Defecto	Energía de impacto (J)
1	20
2	5
3	20
4	5
5	10
6	15
7	10
8	15

Tabla 1 . Energía de impacto por defecto (Placa fibra de carbono)

La segunda probeta es la placa en fibra de vidrio. Es una probeta rectangular que presenta las mismas dimensiones que la probeta en fibra de carbono. Al igual que esta última, también cuenta con ocho defectos distribuidos a lo largo de su superficie (figura 25) producidos por impactos a diferentes niveles de energía (Tabla 2).

A diferencia de la fibra de carbono este material permite, en cierta medida, el paso de la luz a través de su superficie presentando un aspecto translúcido.



Figura 25. Probeta de fibra de vidrio con defectos numerados.



Defecto	Energía de impacto (J)
1	20
2	5
3	20
4	5
5	10
6	15
7	10
8	15

Tabla 2. Energía de impacto por defecto (Placa fibra de vidrio)

La tercera y última probeta, es una placa cuadrada de fibra de vidrio a la que se le ha añadido fibras de aramida o KEVLAR®. Las dimensiones son más reducidas que en las probetas anteriores, en torno a 12 centímetros de lado y con un espesor aproximado de 0.2 centímetros. Esta probeta, a diferencia de las anteriores, no dispone de un defecto causado por un impacto, sino que se trata de una imperfección creada por la disposición y combinación de las fibras dentro de la probeta. Se observa en la probeta (figura 26) que en los bordes se produce un deshilado del entramado de las fibras.

Para simplificar en la redacción, a partir de este momento, esta probeta se nombrará patrón.

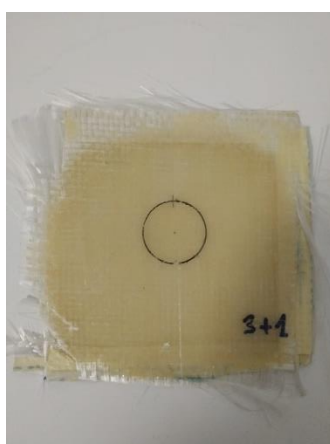


Figura 26. Probeta patrón





### 3.2.2 Preprocesado

Teniendo en cuenta que ya se han realizado los ensayos y se han obtenido el conjunto de imágenes térmicas de cada una de las probetas, se procede al análisis y preparación de los datos que posteriormente serán procesados en un procedimiento que se explica en el apartado 4 del documento.

Para preparar debidamente las imágenes térmicas obtenidas en los ensayos, es necesario tener en cuenta la curva de calentamiento-enfriamiento de los materiales ensayados (figura 27). En la curva de calentamiento-enfriamiento, se observa el procedimiento del ensayo distribuido en tres zonas o regiones. La primera región refleja que durante unos segundos no se produce ningún tipo de alteración sobre la superficie del objeto de ensayo, a continuación, en la región 2 comienza el calentamiento de la superficie del objeto durante unos 10 o 15 segundos, dependiendo del ensayo. Finalmente, se deja de excitar térmicamente la probeta y la temperatura de la superficie va disminuyendo progresivamente, fenómeno que se aprecia en la zona 3 de la curva.

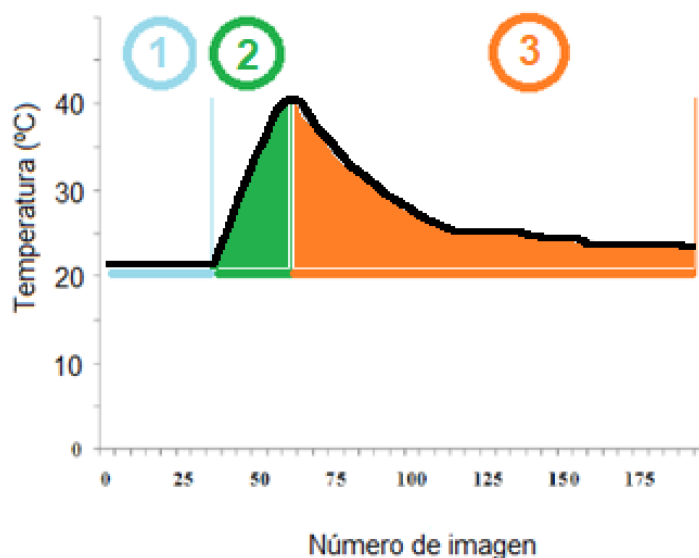


Figura 27. Ejemplo de curva calentamiento-enfriamiento.

Anticipadamente a la aplicación del procesado de imágenes se ha de aplicar un preprocesado o acondicionamiento del conjunto total de las imágenes. Este acondicionamiento consiste en reducir el grupo de imágenes frías a una única sola imagen que represente este conjunto. Esta imagen es el promedio de la agrupación de imágenes frías. Dichas imágenes frías se concentran en la zona 1 de la curva de calentamiento-enfriamiento (figura 27). Este preprocesado tiene por objeto reducir la información de esa parte del ensayo a una única



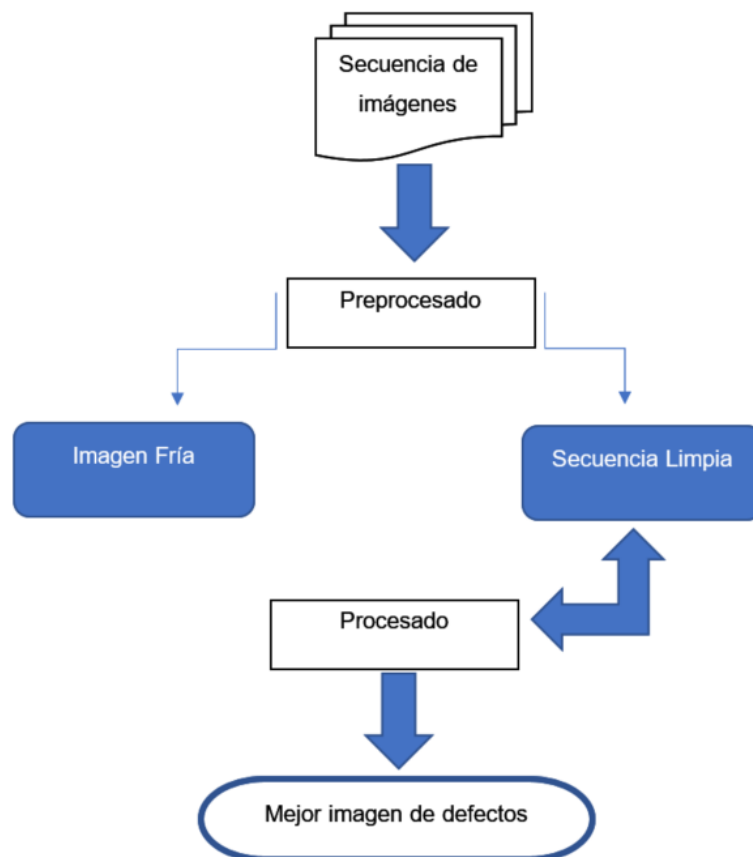


imagen, por otro lado, se elimina en gran medida la presencia de ruido de fondo en las imágenes tomadas y se mejora el contraste térmico.

De esta forma se obtiene un conjunto de datos acondicionado en el cual se aglutina la información correspondiente al calentamiento y enfriamiento del material del objeto de ensayo.

Tanto para el acondicionamiento de los datos como para el posterior procesado se utiliza el software matemático MATLAB®. De esta manera el conjunto de datos se divide en dos matrices de datos e imágenes: la imagen fría, y el conjunto de imágenes donde se calienta y enfría la superficie del material, que recibe el nombre de matriz limpia, o secuencia limpia. Los datos incluidos en la matriz limpia incorporan la información necesaria para la aplicación del procesado.

Una vez que se han acondicionado las secuencias de imágenes se ha de aplicar un procesado para poder detectar y caracterizar los defectos de las probetas ensayadas. El siguiente esquema (Esquema 3) muestra de manera gráfica cual es el desarrollo en el estudio de las secuencias de imágenes.



Esquema 3. Estudio de secuencias de imágenes mediante termografía activa.



## 4-PROCESADO

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se analiza y estudia el conjunto de datos termográficos ya acondicionado obtenido en los ensayos, con el objetivo de detectar y caracterizar los defectos de las probetas ensayadas. Para ello es necesario explicar en qué consisten los diferentes tipos de procesados. Se describen distintas técnicas de procesado previamente a explicar de manera más exhaustiva la técnica en la cual se centra este trabajo: reconstrucción de señales termográficas (TSR). [10][21-22]

### 4.2. TIPOS DE PROCESADO

En esta fase se pretende determinar e identificar los defectos y discontinuidades del objeto de estudio. Existen distintas técnicas de procesado que se pueden clasificar principalmente en cuatro grupos:

- Técnicas que emplean el contraste térmico
- Técnicas basadas en transformadas
- Técnicas que emplean métodos estadísticos
- Técnicas híbridas

#### 4.2.1 Contraste térmico absoluto y relativo (CA y CR)

El contraste térmico absoluto consiste en la diferencia de temperatura de cualquier punto a lo largo de la superficie y la temperatura promedio de una zona de referencia sin defectos ni discontinuidades. El contraste absoluto es el tipo de contraste térmico más sencillo (expresión 7)

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t) \quad (7)$$

Siendo  $T_d(t)$  la temperatura en un punto de la superficie y  $T_{sa}(t)$  la temperatura promedio en una región sin defectos.

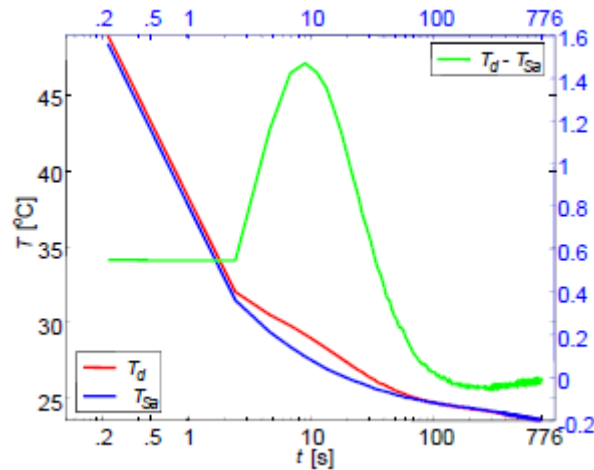


Figura 28. Ejemplo gráfico de la definición de contraste térmico absoluto[10]

El contraste térmico relativo tiene por objeto reducir el impacto de la energía absorbida en el ensayo, por ello se divide la expresión del contraste térmico absoluto por la temperatura promedio de región sana.

$$\Delta T_{cr} = \frac{T_d(t) - T_{sa}(t)}{T_{sa}(t)} \quad (8)$$

#### 4.2.2 Contraste absoluto diferencial (CAD)

La técnica del contraste absoluto diferencial surge a partir de considerar que no se puede comparar la temperatura en un punto de la superficie con el promedio de temperatura en una zona sin defectos, ya que el objeto del proceso es precisamente localizar regiones con defectos y no se puede saber a priori, cuál es la región sana. Se basa en la solución para una dimensión de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada.

La solución para una dimensión de la ecuación de difusión de Fourier se corresponde con la expresión 9:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q_0}{e \sqrt{\pi t}} \quad (9)$$

Donde  $Q_0$  es la energía térmica absorbida,  $T_0$  es la temperatura inicial y  $e$  la efusividad térmica del material.

Si se combina la expresión del contraste absoluto (7) con la expresión anterior (9) se obtiene la expresión para el cálculo del contraste absoluto diferencial:



$$\Delta T_{cad}(t) = T_d + \sqrt{\frac{t'}{t}} T(t') \quad (10)$$

Donde  $t$  es el tiempo y  $t'$  el instante en el que el frente térmico alcanza la superficie del objeto de ensayo. Esta técnica permite modelar los perfiles de evolución de la temperatura en el tiempo sobre la superficie de la muestra.

#### 4.2.3 Termografía de fase pulsada (PPT)

La termografía de fase pulsada (PPT, del inglés *pulsed pase thermography*) es una técnica de procesado que permite cambiar el dominio temporal al dominio frecuencial de la señal de respuesta térmica definida en una dimensión mediante la transformada discreta de Fourier.

$$F(n) = t_s \sum_{k=0}^{N-1} T(kt_s) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = Re\{F(n)\} + Im\{F(n)\} \quad (11)$$

Donde  $Re$  e  $Im$  son la parte real e imaginaria de la transformada discreta de Fourier,  $t_s$  es el periodo de tiempo entre las capturas de imágenes y  $n$  representa los incrementos de frecuencia.

Esta expresión (11) se aplica a cada píxel de la secuencia de imágenes, obteniendo dos nuevas secuencias de imágenes, referidas a la amplitud y la fase. Éstas son simétricas respecto a la frecuencia de 0 Hz, lo que hace redundante la mitad de los datos resultantes y permite reducir el tiempo de cálculo del procesado. Permite estimar la profundidad de los defectos del objeto de estudio. El cálculo de la profundidad del defecto está dado por la frecuencia ciega, donde, las curvas de fase del defecto y de la zona sin defectos se cruzan.

#### 4.2.4 Termografía de componentes principales (PCT)

La termografía de componentes principales (PCT, del inglés *Principal components thermography*) es una técnica que procesa la secuencia de imágenes extrayendo las características más importantes y reduciendo en gran medida el tamaño de los datos. Está basada en descomposición de valores singulares (DVS).



La termografía de componentes principales requiere que la secuencia de imágenes térmicas localizadas en una matriz 3D se transforme en una matriz 2D para poder aplicar el método.

Las columnas de la matriz contienen la dimensión temporal y las filas contienen la dimensión espacial, de este modo, la secuencia completa será una matriz 3D.

$$A = U \cdot R \cdot V^T \quad (12)$$

En la matriz A, las columnas U representan las funciones ortogonales empíricas (EOF) las cuales describen las variaciones espaciales y las columnas de la matriz  $V^T$  representan los componentes principales de las variaciones temporales.

#### 4.2.5 Termografía basada en estadísticos de alto orden (HOS)

Esta técnica de procesamiento emplea métodos matemáticos estadísticos de alto orden. De esta forma se reduce el conjunto de datos obtenidos en el ensayo concentrando toda la información de las imágenes obtenidas en una sola imagen. Esta imagen proporciona la información necesaria acerca de las zonas sanas y de los defectos del objeto de estudio.

Para ello se calculan los momentos centrales normalizados 3 (*skewness*), 4 (*kurtosis*) y 5 a partir de la distribución en un histograma de los valores de temperatura en el tiempo para cada píxel no siendo necesario el cálculo de un contraste térmico previo.

Según este método de termografía basada en estadísticos de alto orden, las distribuciones para los píxeles correspondientes a puntos sanos presentan valores más altos de sus momentos 3 y 4 (más asimétricos y agudos) que su contraparte defectuosa, mientras que el momento 5 central tiende a resaltar las fibras del material compuesto.

#### 4.2.6 Reconstrucción de señales termográficas (TSR)

La reconstrucción de señales termográficas (TSR, del inglés *thermographic signal reconstruction*) es el método de procesado elegido, para este trabajo, con el propósito de analizar y estudiar las secuencias de imágenes obtenidas en los ensayos realizados. Se ha optado por este método dado que ofrece unos resultados fiables, permite un mayor control en el análisis de la curva de calentamiento-enfriamiento de los materiales ensayados, reduce en gran medida la información necesaria para el análisis y contribuye a la eliminación de ruido en alta frecuencia de las imágenes.



Este método se basa en la solución para una dimensión de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada (9) anteriormente citada en el método de contraste absoluto diferencial. Sin embargo, en este caso se extrae el logaritmo natural para dar como resultado la siguiente relación lineal:

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (13)$$

De esta forma los puntos sanos o sin defectos del material mantendrán un comportamiento lineal mientras que los puntos defectuosos se desvían de ese comportamiento lineal lo suficiente para ser detectados (figura 29). Además, el tiempo en el cual esta desviación es máxima se relaciona con la profundidad del defecto. Esta ecuación (9) se puede expresar en forma logarítmica con el objetivo de que la evolución temporal de cada píxel sea aproximada por polinomio de la siguiente forma:

$$\ln[T(t)] = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t) \quad (14)$$

Este es un punto importante ya que con un polinomio se reduce en gran medida la información necesaria para el análisis y se consigue eliminar ruido aleatorio de las imágenes originales.

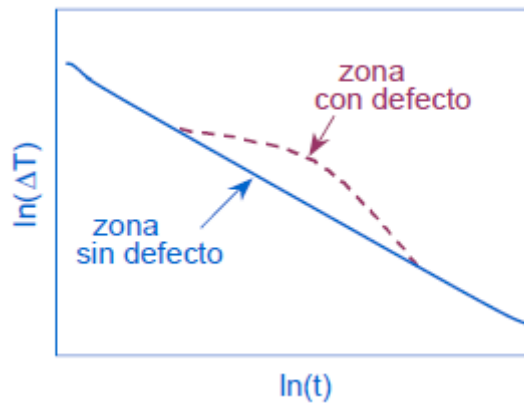


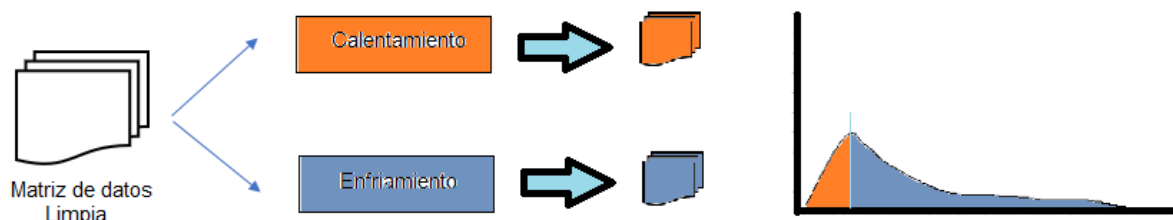
Figura 29 .Diferencia entre zona sana y zona con defecto mediante procesado TSR.[23]



### 4.3 Aplicación del procesado

Para poder aplicar correctamente el procesado de reconstrucción de imágenes termográficas (TSR) sobre las secuencias de imágenes obtenidas en los ensayos, es necesario partir de la matriz de datos limpia que se generó en el preprocesado (Apartado 3.2.2 de este documento). Esta matriz limpia cuenta con la información de las imágenes pertenecientes al proceso de calentamiento y enfriamiento, sin contar ya con las imágenes frías.

Para poder procesar esta información es preciso separar las imágenes en dos grupos, las pertenecientes solamente al calentamiento y las imágenes únicamente del enfriamiento. Por ello se crean dos matrices de datos para cada proceso. De esta manera se aplica el procesado a cada conjunto de imágenes para obtener por separado información del calentamiento y del enfriamiento.



Esquema 4. División de la matriz de datos Limpia

Este proceso se ejemplifica con el ensayo realizado en la probeta patrón con periodo de calentamiento de 15 segundos. De este ensayo se obtuvo una matriz limpia de 171 imágenes térmicas. En primer lugar, se calcula la imagen de toda la secuencia que presenta un punto con la mayor temperatura, en este caso la imagen número 13. Esta imagen corresponde al punto en el cual se dividen las imágenes de la secuencia. De este modo se crea la matriz de calentamiento reuniendo las imágenes de la 1 a la 13, mientras que la matriz de enfriamiento corresponde a las imágenes térmicas que van de la 14 a la 171. A continuación, se muestran imágenes térmicas obtenidas de la secuencia de calentamiento y enfriamiento (figuras 30 y 31). De las 13 imágenes de la secuencia de calentamiento, se han seleccionado las imágenes 1, 4, 8 y 13. Para el caso de la secuencia de enfriamiento se han seleccionado las imágenes 14, 66, 120 y 171.

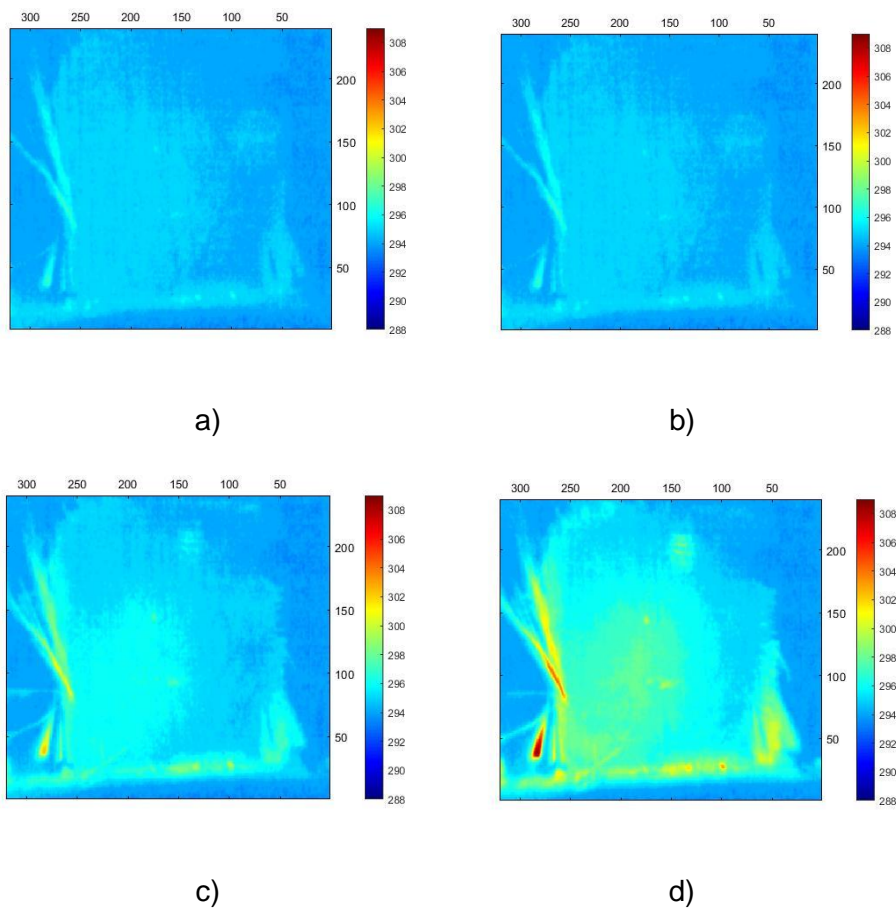
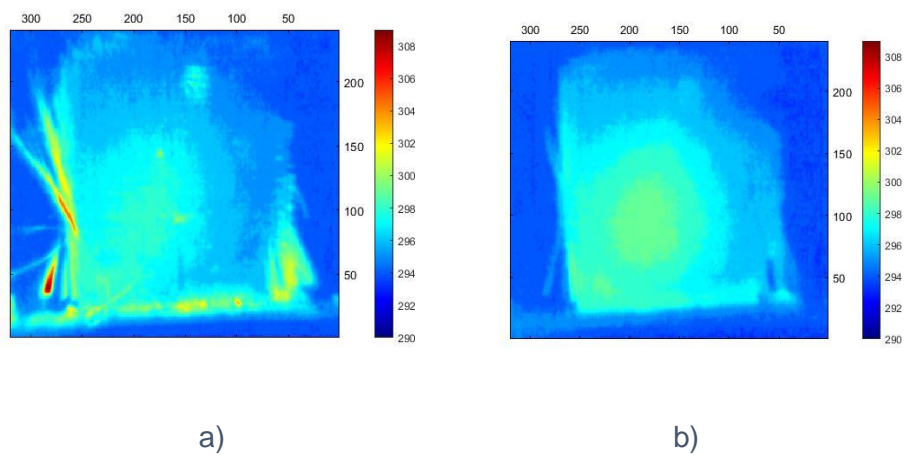


Figura 30 . Secuencia de calentamiento, a) Primera imagen del calentamiento, b) imagen 4 del calentamiento, c) imagen 8 del calentamiento, d) última imagen correspondiente al calentamiento





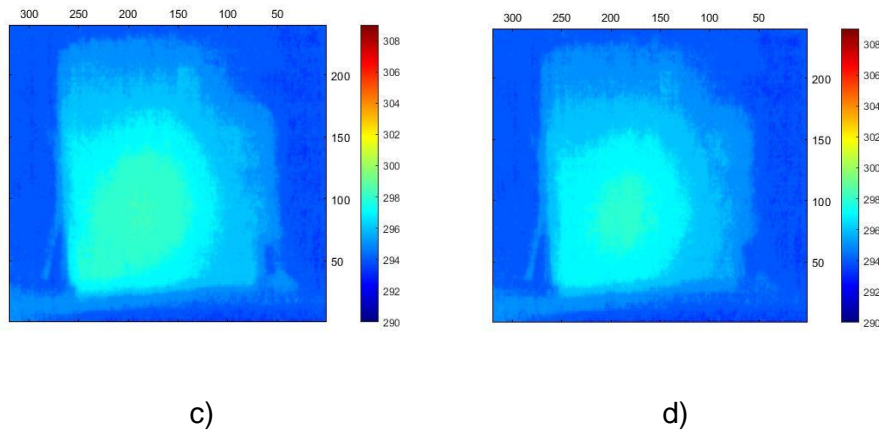


Figura 31. Secuencia de enfriamiento a) Primera imagen del enfriamiento, b) imagen 66 de la secuencia, c) imagen 120 de la secuencia, d) última imagen correspondiente al enfriamiento

Se puede observar en ambas secuencias el proceso de calentamiento y enfriamiento respectivamente (figura 30 y 31), sin embargo, aún no son apreciables los defectos. Por ello, se aplica el procesado que proporciona a su vez, dos matrices de datos. Una matriz de datos sintéticos en la cual se puede observar las secuencias de calentamiento y enfriamiento con mayor detalle y nitidez, lo que permite distinguir y localizar los defectos. Por otro lado, el procesado genera una matriz de datos que se corresponde con los coeficientes del polinomio citado (14) en la explicación del método de reconstrucción de señales termográficas (apartado 4.2.6). De esta forma, se puede modelar el polinomio que relaciona el logaritmo de la temperatura con las diferentes potencias del logaritmo de la variable temporal, el cual, proporciona información acerca del comportamiento térmico de los materiales ensayados permitiendo también la detección y localización de defectos.



## 5-RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se muestran y discuten los resultados obtenidos tras el procesado de las imágenes térmicas.

Siguiendo con el ejemplo referido al ensayo de la probeta patrón con periodo de calentamiento de 15 segundos, se muestran las secuencias de imágenes procesadas obtenidas.

### 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Las secuencias de calentamiento y enfriamiento ya procesadas (figuras 32 y 34) agrupan cuatro imágenes cada una. En el caso de la secuencia de calentamiento se han seleccionado las imágenes 1,4,8 y 13 de las 13 disponibles, mientras que en el caso de la secuencia de enfriamiento de las 158 imágenes restantes se han seleccionado las imágenes 14,66,120 y 171. En estas imágenes se puede apreciar cómo la superficie del objeto absorbe o cede temperatura, además, se distinguen defectos o discontinuidades sobre la superficie del objeto de ensayo.

Las secuencias de imágenes correspondientes a los coeficientes del polinomio (figuras 33 y 35) son secuencias de seis imágenes que se corresponden con cada uno de los coeficientes de la ecuación (14) de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada, expresada en forma logarítmica con el fin de expresar así la evolución temporal de cada píxel. Si se simplifica de manera generalizada dicha expresión, se obtiene:

$$T = Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + F \quad (15)$$

De este modo, cada imagen se corresponde a un coeficiente de la ecuación. Estas secuencias aportan información acerca de la localización de defectos, además se puede observar la zona en la cual se ha formado el golpe de calor proporcionado por la pistola de aire caliente. En la siguiente imagen de la secuencia de calentamiento (figura 37) se distinguen defectos sobre la superficie del objeto. En el caso de la secuencia de enfriamiento (figura 35), se distingue claramente el golpe de calor proporcionado, además, se aprecia perfectamente los defectos del objeto de ensayo (figura 38).

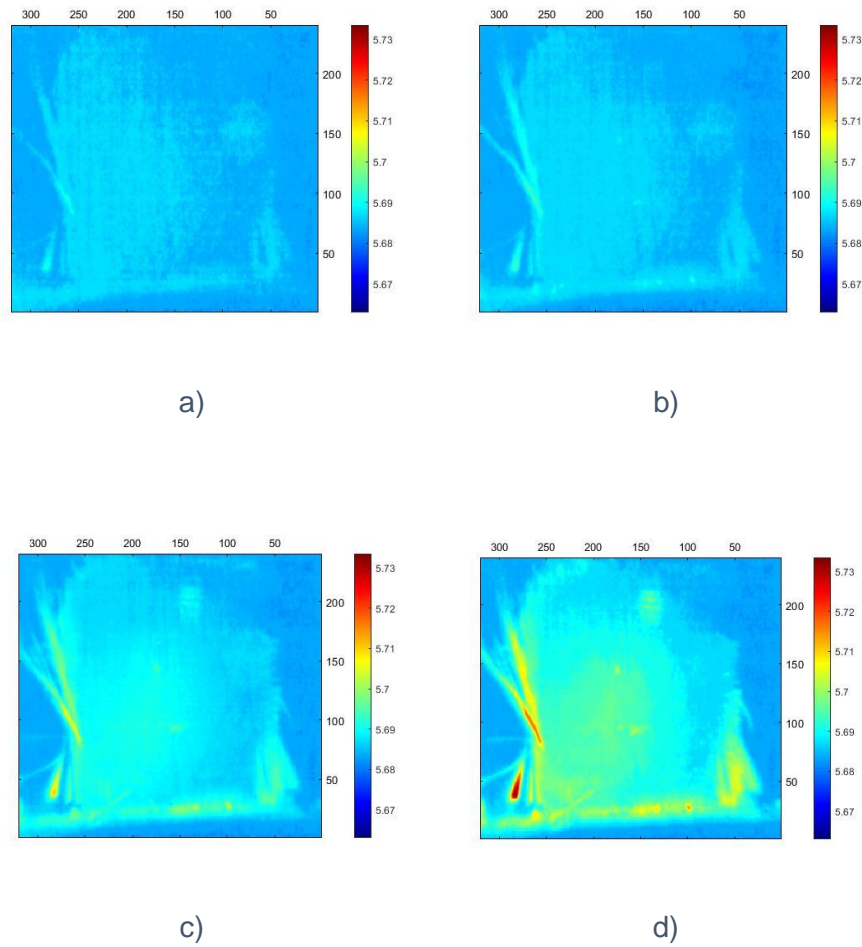


Figura 32. Secuencia de datos sintéticos de calentamiento a) Primera imagen procesada del calentamiento, b) imagen 4 de la secuencia procesada, c) imagen 8 de la secuencia procesada, d) última imagen procesada correspondiente al calentamiento, imagen13 de la secuencia.

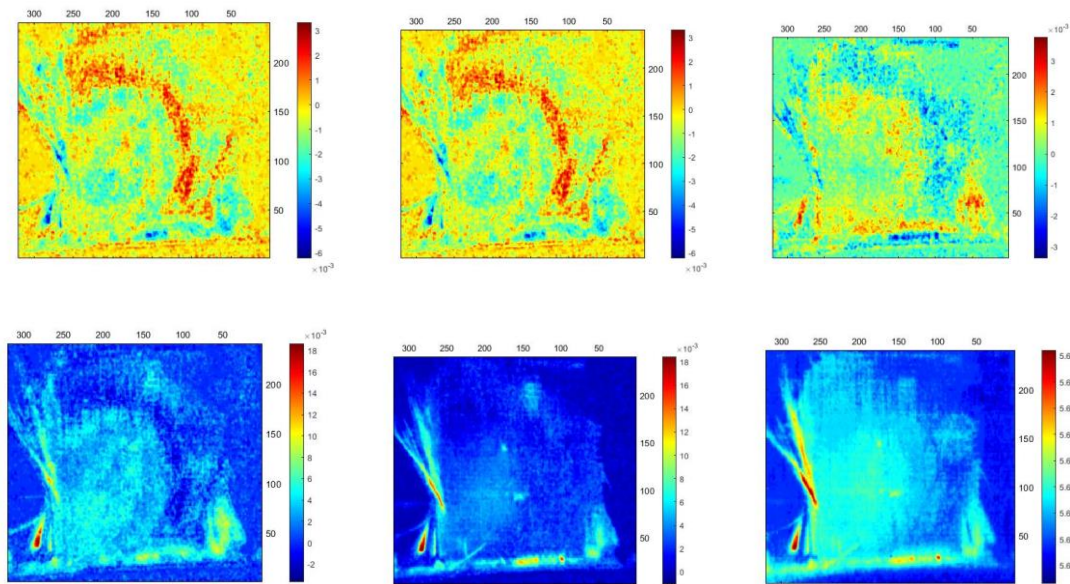


Figura 33. Secuencia correspondiente a los coeficientes del polinomio de calentamiento De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se corresponden con los coeficientes A,B,C,D,E y F de la ecuación (15).

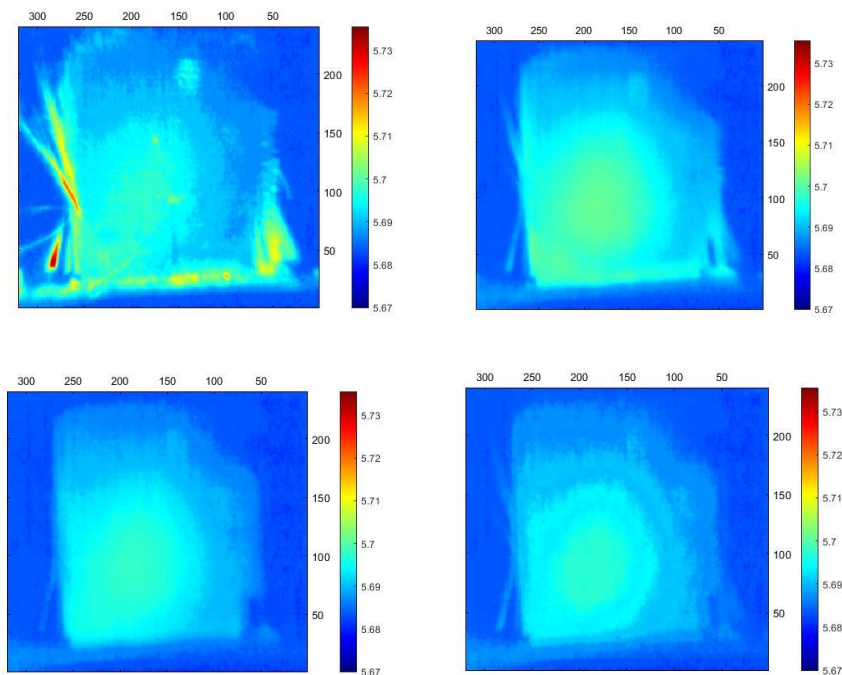


Figura 34. Secuencia de datos sintéticos de enfriamiento a) Primera imagen procesada del enfriamiento, imagen 14 de la secuencia, b) imagen 66 de la secuencia de procesada, c) imagen 120 de la secuencia procesada, d) última imagen procesada correspondiente al enfriamiento, imagen13 de la secuencia.

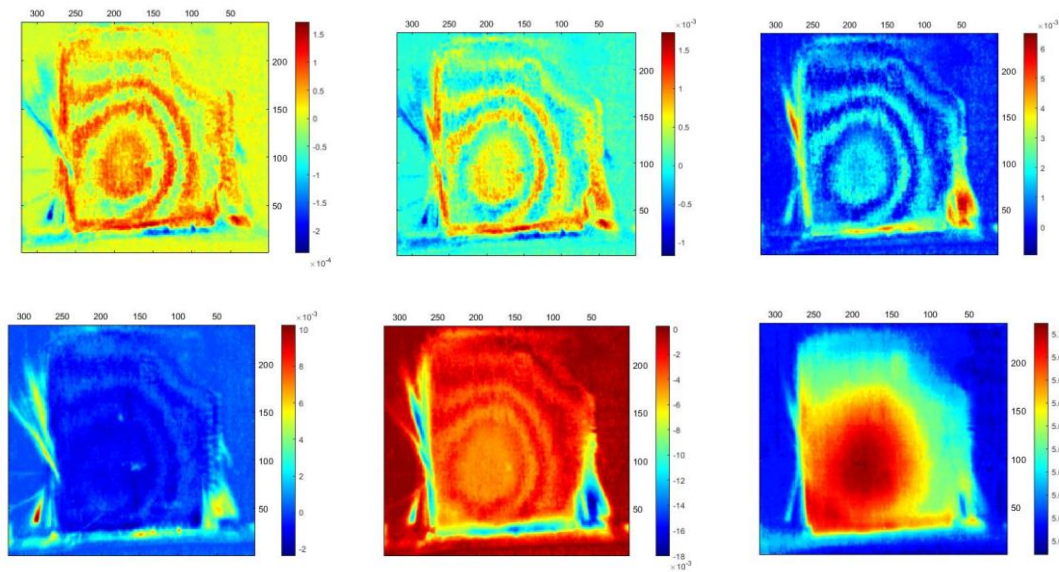
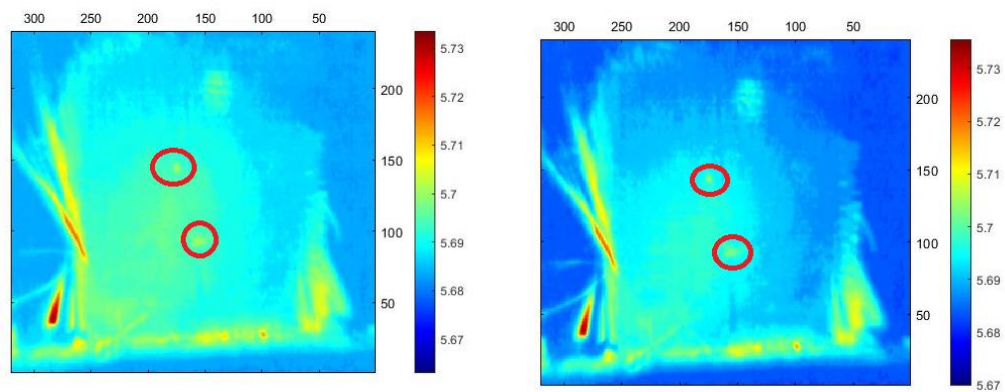


Figura 35. Secuencia correspondiente a los coeficientes del polinomio de enfriamiento. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se corresponden con los coeficientes A,B,C,D,E y F de la ecuación (15).



a)

b)

Figura 36 .a) Defectos detectados en la secuencia de calentamiento. b) Defectos detectados en la secuencia de enfriamiento.



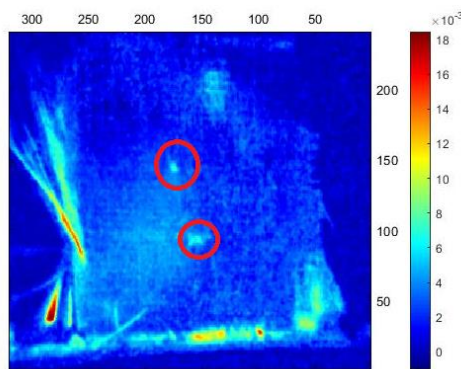


Figura 37. Defectos localizados en la imagen correspondiente al coeficiente E de la secuencia de calentamiento.

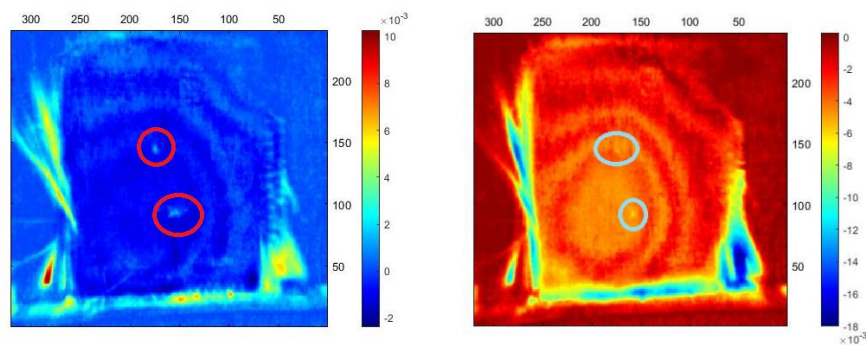
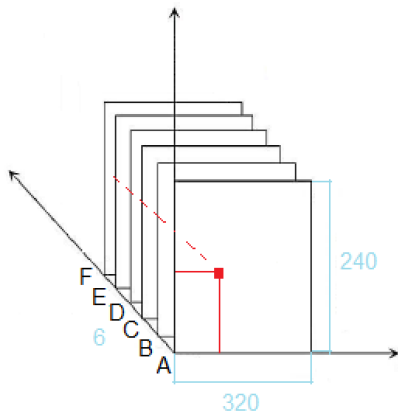


Figura 38. Defectos localizados en la imagen correspondientes a los coeficientes D y E de la secuencia de enfriamiento.

A la vista de estos resultados, se considera que la secuencia de enfriamiento proporciona más control e información acerca de la localización de los defectos sobre la superficie del objeto, así como del golpe de calor proporcionado para excitar térmicamente la superficie de la probeta.

Con el objeto de profundizar en el análisis de la secuencia de imágenes de coeficientes, se han realizado dos gráficos que estudian el comportamiento de un píxel perteneciente a la zona sana de la probeta, a lo largo de las seis imágenes de coeficientes tanto de enfriamiento como de calentamiento, respecto a un píxel perteneciente a un impacto o defecto.



Se han seleccionado dos píxeles, uno correspondiente a la zona sana y otro en una zona de impacto y se han estudiado sus valores en cada una de las matrices referidas a los coeficientes de la ecuación de difusión de Fourier tanto en el calentamiento como en el enfriamiento.

Se han tomado los coeficientes de la ecuación (15) a excepción del coeficiente F puesto que no aporta información relevante presentando aproximadamente el mismo valor en cada procesado.

Se observa en la figura 39 las diferencias en cuanto al valor de un píxel perteneciente a una zona sana respecto de un píxel perteneciente a una zona de defecto o impacto.

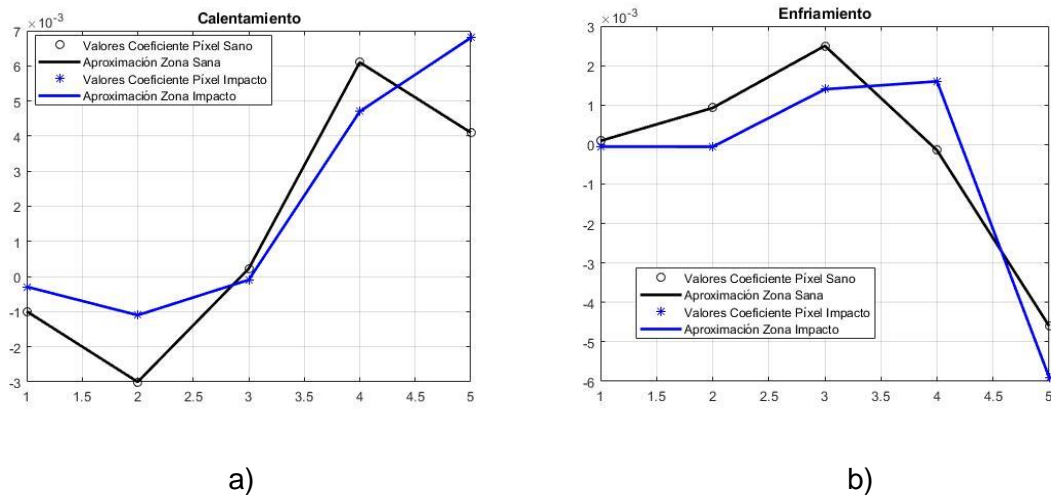


Figura 39.a) Comportamiento píxel en zona de sana frente a píxel en zona de defecto durante el calentamiento.

b) Comportamiento píxel en zona de sana frente a píxel en zona de defecto durante el enfriamiento.

En último lugar, se establece un comparativo, a partir de los ensayos realizados, del comportamiento de los píxeles en las imágenes pertenecientes a los coeficientes D y E en fibra de carbono y en fibra de vidrio. Se emplean los coeficientes D y E ya que son los que aportan información más interesante durante el proceso de enfriamiento. Se establece, por tanto, una relación entre el comportamiento de los píxeles pertenecientes a la zona de impacto en las imágenes de coeficientes D y E respecto de cuatro impactos con diferentes niveles de energía llegando a los resultados obtenidos en la figura 40. Esta figura pretende



establecer una idea de la tendencia y comportamiento de los píxeles en función del material empleado.

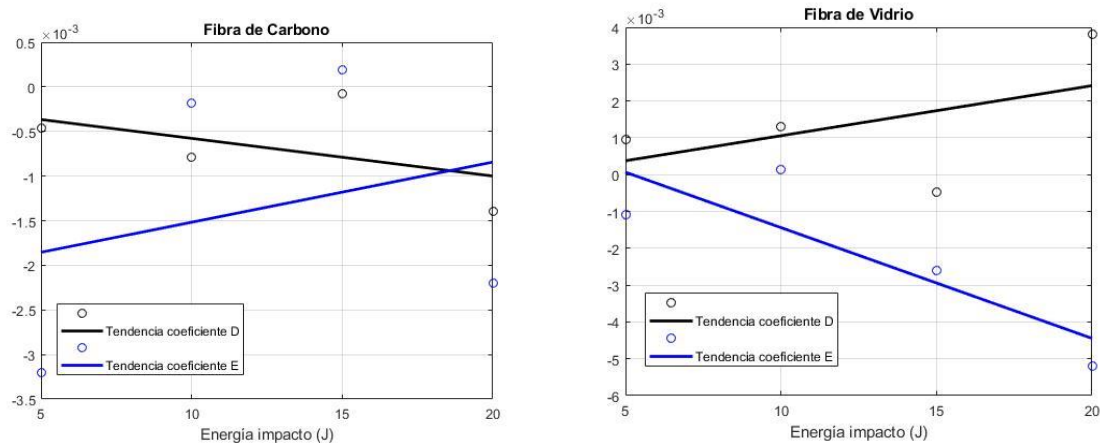


Figura 40. Tendencias de píxeles respecto a energía de impacto en fibra de carbono y fibra de vidrio.

Después de aplicar la regresión de mínimos cuadrados como una tendencia lineal, se observa en la figura 40 que en función del material los datos presentan una tendencia ascendente o descendente. En el caso de la fibra de carbono la tendencia del coeficiente D es descendente, sin embargo, en el caso de la fibra de vidrio es ascendente. De manera contraria ocurre con la tendencia del coeficiente E siendo ascendente en el caso de la fibra de carbono y descendente en el caso de la fibra de vidrio.





## 6-CONCLUSIONES

Tras la finalización de este proyecto, se ha cumplido el objetivo de realizar ensayos en laboratorio de diferentes materiales, mediante termografía activa pulsada, con el fin de determinar defectos en su superficie. Con los conocimientos previos adquiridos para el desarrollo de los ensayos, se ha logrado llevar a cabo el estudio de tres probetas de diferentes materiales compuestos.

Ha quedado demostrado que mediante el apoyo del software matemático MATLAB se puede aplicar el método de reconstrucción de señales termográficas (TSR) con resultados en los que se aprecian los defectos y discontinuidades. Durante el procesado de las imágenes se observó que delimitar las zonas de estudio sobre las probetas con cinta adhesiva puede ser contraproducente, por un lado, contribuye a una mejor división de las zonas de estudio, pero por otro lado se apreció cómo la propia cinta reflejaba en gran medida la excitación térmica proporcionada, dificultando las labores de procesado.

Durante el procesado se ha observado cómo los parámetros D y E de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada muestran mejores resultados en la detección de defectos o impactos.

Después del tiempo dedicado al estudio de la termografía activa y sus técnicas, se ha entendido la dificultad matemática que existe detrás de los códigos empleados, así como la complejidad, importancia y relevancia que tiene la termografía en el estudio de los materiales para aplicaciones tales como la seguridad y control de calidad de materiales compuestos.



## 7-LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En lo referente a posibles mejoras que resulten de interés en el desarrollo de futuros trabajos cabe destacar el empleo de una cámara que tome imágenes a una mayor velocidad con el propósito de estudiar con mayor precisión los cambios de temperatura de los materiales ensayados.

Por otro lado, se puede automatizar el tiempo de funcionamiento de la fuente de calor para eliminar el factor humano en el cómputo del tiempo y de esta manera evitar las diferencias de tiempo de calentamiento durante los ensayos.

Otro factor importante que tener en cuenta puede ser la utilización de probetas que no presenten recubrimientos que puedan generar reflejos sobre su superficie. Este hecho contribuye negativamente en el procesado de las imágenes térmicas.

La termografía activa y las diferentes técnicas de aplicación están en continuo desarrollo y evolución, la utilización de cualquiera de las otras técnicas de procesado puede arrojar interesantes resultados en el estudio de la presencia de defectos en materiales compuestos.



## 8-BIBLIOGRAFÍA

- [1] AEND (Asociación española de ensayos no destructivos). “Introducción a los END”. Revisión 0. 2016.[EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]  
<https://congresomantenimientocanarias.com/wp-content/uploads/2018/11/D-Introducción-ensayos-no-destructivos.pdf>
- [2] M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, J. Roa Fernández. “Los composites: características y aplicaciones en la edificación”. p 46-55. 2003.
- [3] Juan Antonio Polanco Madrazo, Soraya Diego Cavia, Carlos Thomas García. OCW Universidad de Cantabria, dpto. de ciencia e ingeniería de los materiales. (Materiales de construcción). “Lección 15 materiales compuestos”
- [4] Jesús Setién Marquínez, Jose Antonio Casado del Prado, Soraya Diego Cavia, Carlos Thomas García. OCW Universidad de Cantabria, dpto. de ciencia e ingeniería del terreno de los materiales. (Materiales). “Lección 17 materiales compuestos”
- [5] Franco Stupenengo. “Materiales y materias primas”. Capítulo 10. [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]  
<https://docplayer.es/4105979-Materiales-y-materias-primas.html>
- [6] Félix C. Gómez de León, Antonio González Carpena. OCW Universidad de Murcia “Curso de resistencia de materiales y cálculo de estructuras”. Tema 8
- [7] Antonio Miravete. “Materiales compuestos” Tomo I. Ed Reverté. 2012.
- [8] <https://worldofndt.com/introduction-to-eddy-current-testing/> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [9] <https://www.szutest.com/non-destructive-testing/> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [10] Andrés David Restrepo Girón. “Contribución a la solución del problema de detección y caracterización de defectos en termografía activa mediante procesamiento espacio-temporal de secuencias de imágenes infrarrojas” p 4-11, p16-25, 2012.
- [11] <https://marinesol.org/infrared-thermography/> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Pulsed-thermography-set-up\\_fig1\\_344303158](https://www.researchgate.net/figure/Pulsed-thermography-set-up_fig1_344303158) [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [13] [https://www.researchgate.net/figure/Configuration-for-burst-vibrothermography\\_fig7\\_267809551](https://www.researchgate.net/figure/Configuration-for-burst-vibrothermography_fig7_267809551) [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [14] <https://www.laplataforma.es/es/madrid/manta-de-fibra-de-vidrio-1-m2> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [15] <https://culturacientifica.com/2016/10/10/hidrogeno-partir-composites-fibra-carbono/> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]



- [16] <https://www.castrocompositesshop.com/es/28-aramida-kevlar> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [17] <https://www.aceromafe.com/que-es-el-polietileno/> , <https://www.globalpiyasa.com/es/product-detail/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-fiber-uhmwpe-fiber-tunanets-ag-sa/217644> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [18] <http://www.ce-fire.com/2013/12/fibras-ceramicas-de-alta-temperatura/> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [19] FLIR. “Cámaras infrarrojas para investigación y desarrollo” [www.flir.com](http://www.flir.com) [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [20] FLIR introduces Thermacam® SC 2000 High performance thermal imaging system <https://www.photonicsonline.com/doc/flir-introduces-thermacam-sc-2000-high-performance-0001> [EnLínea] [Accedido 3 Septiembre 2021]
- [21] Hernán Darío Benítez Restrepo, Clemente Ibarra Castanedo, Abdel Hakim Bendada, Xavier Maldaque, Humberto Loa Iza, Eduardo Caicedo. “Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales”
- [22] Rafael Hidalgo-Gato García. “Contribuciones al preprocesado, procesado y análisis en termografía infrarroja aplicados a ensayos no destructivos” Tesis doctoral Universidad de Cantabria dirigida por F.J.Madruga Saavedra, José Miguel López Higuera.2015



## 9-ANEXO

### 9.1 CÓDIGO EMPLEADO

#### 9.1.1 Función para aplicar el método de procesamiento TSR

```
function TSR_rutina_f(directorio,fichero)
%Programa para el calculo de los coeficientes de ajuste par la
reconstruccion de seÑales termograficas y generacion de datos sinteticos

%Limpiar

clc;
clear all;
close all;

%Defintion of variables

p=single([]);
S=single([]);
mu=single([]);
Cap=single([]);
tam=single([]);
Datsint=single([]);
%T

%Definicion de variables

% directorio=input('path: ','s');
% fichero=input('file: ','s');
% file=[directorio, '\Limp_',fichero,'.mat'];
% load(file);
Cap=cooling;%AQUI CAMBIAMOS LA MATRIZ QUE QUEREMOS
% file=[directorio, '\imgfria_',fichero,'.mat'];
% load(file);
imafria=single(fria);
clear Limp fria;
tam=single(size(Cap));
numero=single(tam(3));
for i=1:1:numero
    B(:, :, i)=single(log(Cap(:, :, i)) );% QUITAMOS LA IMAGEN FRIA Y LISTO NO SE
ELIMINA EL RUIDO
end
clear Cap imafria i;

% Proceso de calculo
```



```
disp='Start TSR'
tic;
x=single(log(1:numero));
for i=1:1:tam(1)
    for j=1:1:tam(2)
        [p(i,j,:),S,mu]=polyfit(x,squeeze(B(i,j,:))',5);
    end
end

t=toc;
% file=[directorio, '\TSR_',fichero,'.mat'];
% save(file,'t', 'p');
disp='End TSR'

%Generar datos sinteticos

disp='Start Datsint';
tic;
for i=1:1:tam(1)
    for j=1:1:tam(2)
        Datsint(i,j,:)=single(polyval(squeeze(p(i,j,:))',x,S,mu));
    end
end
t=toc;
% file=[directorio, '\Datsint_',fichero,'.mat'];
% save(file,'t', 'Datsint');
% clear all;
disp='End Datsint';
end
```

### 9.1.2 Comportamiento de píxel en calentamiento y enfriamiento

```
%--- DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PÍXEL EN CALENTAMIENTO Y
% ENFRIAMIENTO
% %-----EJEMPLO Calentamiento-----
---
%Se ha cogido el PIXEL SANO (72,215,-)
%Se ha cogido el PIXEL IMPACTO (93,158,-)          (240-320-6)
syms x
figure()
% Conjunto de valores de coeficientes obtenidos en el procesado sin y con
% impacto
A=-0.00099093;
B=-0.0030;
C=0.00022518;
D=0.0061;
E=0.0041;
Ai=-0.00029077;
Bi=-0.0011;
Ci=-0.000093854;
Di=0.0047;
Ei=0.0068;
```



```
x=[1:5];
y=[A B C D E];
plot(x,y,'ok')
hold on
c=polyfit(x,y,5);
yy=polyval(c,x);
plot(x,yy,'k','LineWidth',2)
grid on
hold on
x1=[1:5];
y1=[Ai Bi Ci Di Ei];
plot(x1,y1,'*b')
hold on
c1=polyfit(x1,y1,5);
yyy=polyval(c1,x1);
plot(x1,yyy,'b','LineWidth',2)
hold off
title('Calentamiento')
legend('Valores Coeficiente Píxel Sano ','Aproximación Zona Sana','Valores
Coeficiente Píxel Impacto','Aproximación Zona Impacto')
% %-----EJEMPLO Calentamiento-----
---
figure()
% Conjunto de valores de coeficientes obtenidos en el procesado sin y con
% impacto
A2=0.000092855;
B2=0.00092768;
C2=0.0025;
D2=-0.00014709;
E2=-0.0046;
Ai2=-0.000054253;
Bi2=-0.000057293;
Ci2=0.0014;
Di2=0.0016;
Ei2=-0.0059;
x2=[1:5];
y2=[A2 B2 C2 D2 E2];
plot(x2,y2,'ok')
hold on
c2=polyfit(x2,y2,5);
yy2=polyval(c2,x2);
plot(x2,yy2,'k','LineWidth',2)
grid on
hold on
x3=[1:5];
y3=[Ai2 Bi2 Ci2 Di2 Ei2];
plot(x3,y3,'*b')
hold on
c3=polyfit(x3,y3,5);
yy3=polyval(c3,x3);
plot(x3,yy3,'b','LineWidth',2)
hold off
title('Enfriamiento')
legend('Valores Coeficiente Píxel Sano ','Aproximación Zona Sana','Valores
Coeficiente Píxel Impacto','Aproximación Zona Impacto')
```



### 9.1.3 Comportamiento píxel en función del material

```
syms x
%-----FIBRA DE CARBONO-----
figure()

D2D=-0.00045951;
D2E=-0.0032;
D5D=-0.00079081;
D5E=-0.00018199;
D6D=-0.00008126;
D6E=0.000187;
D1D=-0.0014;
D1E=-0.0022;
x=[5 10 15 20];
y=[D2D D5D D6D D1D];
plot(x,y,'ok')
hold on
c=polyfit(x,y,1);
yy=polyval(c,x);
plot(x,yy,'k','LineWidth',2)
grid on
yE=[D2E D5E D6E D1E];
plot(x,yE,'ob')
hold on
c1=polyfit(x,yE,1);
yyy=polyval(c1,x);
plot(x,yyy,'b','LineWidth',2)
title('Fibra de Carbono')
xlabel('Energía impacto (J)')
legend('','Tendencia coeficiente D','','Tendencia coeficiente E')
%-----FIBRA DE VIDRIO-----
figure()
D2DV=0.00094616;
D2EV=-0.0011;
D5DV=0.0013;
D5EV=0.00013653;
D6DV=-0.00046469;
D6EV=-0.0026;
D1DV=0.0038;
D1EV=-0.0052;
y1=[D2DV D5DV D6DV D1DV];
plot(x,y1,'ok')
hold on
c2=polyfit(x,y1,1);
yy2=polyval(c2,x);
plot(x,yy2,'k','LineWidth',2)
grid on
yE2=[D2EV D5EV D6EV D1EV];
plot(x,yE2,'ob')
hold on
```





```
c3=polyfit(x,yE2,1);  
yy3=polyval(c3,x);  
plot(x,yy3,'b','LineWidth',2)  
title('Fibra de Vidrio')  
xlabel('Energía impacto (J)')  
legend('','Tendencia coeficiente D','','Tendencia coeficiente E')
```